

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_



«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПЕРЕСАДА  
(підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи**

**автоматизації, електропривод та електромобільність»**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»**

**на тему:**

Лінійний електропривод вагонетки

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ЕП-91мп

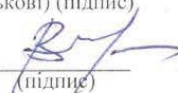
Довбик Антон Юрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник к.т.н., доцент Теряєв Віталій Іванович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

  
(підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент к.т.н., доцент Чумак Вадим Володимирович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) Довбик Антон Юрійович  
(підпис)

Київ – 2020 р.

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПЕРЕСАДА  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту  
Довбика Антона Юрійовича  
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації Лінійний електропривод вагонетки \_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації Теряєв Віталій Іванович, к.т.н., доцент \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації 12.12.2020

3. Об'єкт дослідження процеси електромеханічного перетворення енергії в лінійному електроприводі.

4. Вихідні дані маса вагонетки з людьми 720 кг; кут підйому 45°; довжина підйому 30 м; номінальна швидкість 5 м/с; максимальне прискорення 6 м/с<sup>2</sup>.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити аналітичний огляд систем систем лінійного електроприводу, обґрунтування виду електроприводу, розрахунок потужності тягового лінійного електродвигуна, вибір

електричного обладнання, складання математичної моделі електромеханічного об'єкта, синтез системи керування, дослідження статичних і динамічних режимів роботи електромеханічної системи, стартап – проект впровадження результатів.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу загальний вид установки, принципова схема електроприводу, схема автоматизації, алгоритм автоматизації, результати моделювання.

7. Орієнтовний перелік публікацій лінійний електропривод вагонетки атракціону, особливості математичного моделювання лінійного асинхронного двигуна з довгим індуктором.

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв


#### 9. Дата видачі завдання 01.09.2020

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Вступ Аналітичний огляд в області транспортних засобів з лінійним електроприводом: - різновиди, принцип роботи, переваги та недоліки лінійних електродвигунів; - приклади промислового та транспортного застосування; - основні характеристики, особливості керування та моделювання лінійних двигунів.	30.09.20	
2	Опис розважального комплексу, постановка задачі, розробка вимог до лінійного електроприводу і системи автоматизації	5.10.20	
3	Визначенні параметрів та розрахунок лінійного електродвигуна	19.10.20	
4	Вибір силового обладнання для лінійного електроприводу	26.10.20	
5	Розробка структурної схеми, синтез системи	9.11.20	

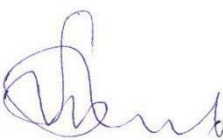
	автоматичного керування (математична модель електроприводу, розрахунок параметрів складових електроприводу, структурно-параметричний синтез системи)		
6	Дослідження і аналіз статичних і динамічних характеристик автоматизованого електропривода	16.11.20	
7	Проектування системи керування електропривода (систем електропостачання, електричного захисту та автоматизації)	25.11.20	
8	Розробка схеми електричної принципової і підключень (з'єднань) автоматизованого електропривода	25.11.20	
9	Стартап-проект. Економічне обґрунтування технічних рішень	25.11.20	
10	Висновки Список використаних джерел	30.11.20	
11	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту	2.12.20	

Студент

  
 (підпис)

Антон ДОВБИК

Науковий керівник дисертації

  
 (підпис)

Віталій ТЕРЯЄВ

## РЕФЕРАТ

5

Магістерська дисертація включає в себе 101 сторінок, 32 рисунків, 29 таблиць, 6 листів А1, 30 використаних джерел.

Метою магістрської роботи є розробка та дослідження лінійного електроприводу вагонетки розважального атракціону.

В роботі проведено аналітичний огляд існуючих видів приводів вагонеток атракціонів і скіпових підйомників, дослідження статичних і динамічних режимів лінійного електроприводу вагонетки. Розроблено алгоритм керування секціями лінійного двигуна. Виконано вибір керуючого та силового обладнання, розраховано параметри електромеханічної системи вагонетки атракціону. Проаналізовано отримані результати розрахунків, моделювання та зроблені висновки.

ВАГОНЕТКА, ЛІНІЙНИЙ АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, КОЕФІЦІЄНТ ПЕРЕКРИТТЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ІНДУКТОР, ВТОРИННИЙ ЕЛЕМЕНТ, РЕАКТИВНА ПОЛОСА

					<i>141.62202.06.МД</i>			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лінійний електропривод вагонетки	Лім	Маса	Масштаб
Розроб.	Довбик А.Ю.					Т		
Перевір.								
Керівник	Геряев В.І.					Лист 5    Листів 101		
Н. контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Затверд.	Пересада С.М.					Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕПз – 91мп		

## ABSTRACT

The master's dissertation includes 101 pages, 32 figures, 29 tables, 6 sheets A1, 30 used sources.

The purpose of the master's thesis is to develop and study of a roller coaster linear electric drive.

The analytical review of the existing types of roller coasters train drives and skip lifts, research of static and dynamic modes of the linear electric drive of the trolley is carried out in the work. An algorithm for controlling sections of a linear motor has been developed. The choice of control and power equipment is made, the parameters of the electromechanical system of the attraction trolley are calculated. The obtained results of calculations, modeling and conclusions were analyzed.

TRAIN, LINEAR INDUCTION MOTOR, OVERLAPE COEFFICIENT, CONTROL SYSTEM, INDUCTOR, SECONDARY ELEMENT

					<i>141.62202.06.МД</i>				
					Лінійний електропривод  вагонетки	Лім		Маса	Масштаб
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			Т		
Розроб.	Довбик А.Ю.								
Перевір.									
Керівник	Геряєв В.І.					Лист 6		Листів 101	
Н. контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕПз – 91мп			
Ватверд.	Пересада С.М.								

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД .....	13
1.1 Актуальність теми .....	13
1.2 Призначення, конструкція та характеристики скіпових підйомників... 13	
1.3 Скіпові підйомники вагонеток атракціонів .....	16
1.4 Лінійні асинхронні електродвигуни .....	18
1.5 Застосування ЛАД на транспорті .....	28
1.6 Застосування ЛАД в вагонетках атракціонів .....	29
1.7 Вимоги до лінійного електроприводу і системи автоматизації .....	37
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРАХУНОК ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	39
2.1 Конструктивні рішення .....	39
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БАГАТОСЕКЦІЙНИМ.....	53
ЛІНІЙНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ З ДОВГИМ ІНДУКТОРОМ.....	53
3.1 Вибір силового обладнання для лінійного електроприводу.....	53
3.2 Розробка схеми керування багатосекційним ЛАД .....	56
4 СИНТЕЗ БЕЗКОНТАКТНОЇ СХЕМИ КЕРУВАННЯ БАГАТОСЕКЦІЙНИМ ЛАД.....	60
5. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ЛАД .....	70
6 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ .....	76
7. СТАРТАП-ПРОЕКТ. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ.....	82
7.1 Опис ідеї проекту .....	82

7.2 Технологічна перевірка ідеї .....	83
7.3 Можливість запуску проекту при наявних ринкових умовах .....	84
7.5 Розробка маркетингової стратегії стартап-проекту.....	92
ВИСНОВКИ.....	95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ .....	98



## ВСТУП

Існує ряд транспортних механізмів для переміщення вантажів і пасажирів, рухомим елементом яких є вагонетки або екіпажі, що переміщуються по заданій траєкторії під нахилом. Прикладами таких механізмів є скипові підйомники та атракціони типу «Американських гірок».

Атракціони залишаються популярною розвагою для людей вже на протязі багатьох років. Американські гірки є сучасним видом розваг і завдяки прогресу технологій постійно удосконалюються, стають все більшими, швидшими та страшнішими. Перший прототипом сучасних американських гірок можна вважати вагонетки для транспортування вугілля у 1800-х роках. Залізниця була побудована для транспортування вугілля з гори в місто в штаті Пенсільванія, США. Але у вихідні дня ця вагонетка арендувалась ентузіастами, які сідали в вагонетку і їхали суто для задоволення.

Насолода на американських гірках пов'язана з пошуком відчуття захвату - тенденцією насолоджуватися різноманітними, новими та інтенсивними фізичними переживаннями, такими як скелелазіння та стрибки з парашутом. Люди продовжують насолоджуватися американськими гірками завдяки поєднанню швидкості, подолання страху та позитивних наслідків, пов'язаних із масовим підйомом фізіологічного збудження. Поїздка на американських гірках є законним, загалом безпечним і відносно дешевим засобом переживання природного максимуму.

Підвищена безпека є найголовнішим критерієм при розробці або модифікації атракціонів з рухомими елементами. Для атракціонів з рухомими кабінами, візками або вагонетками постає проблема зношування та проковзування роликів обертального електроприводу, особливо в режимах пуску-гальмування, що обмежує динаміку і підвищує експлуатаційні витрати. Лінійний електропривод здатен забезпечити підвищення безпеки, покращення експлуатаційних характеристик, економію енергії, зниження витрат на обслуговування.

Метою магістерської дисертації є розробка електроприводу вагонетки з лінійним двигуном та системи автоматизації маршруту руху для розважального атракціону. В ході виконання роботи передбачається конструкторська проробка та розрахунок лінійного асинхронного електродвигуна, визначення параметрів, що підлягають контролю, регулюванню та сигналізації; вибір пристроїв і засобів контролю та регулювання, що дозволяють управляти ходом робочого процесу, дослідження роботи електромеханічної системи.

Автоматизація процесу руху сприятиме підвищенню безпеки, економії енергії, матеріалів, зменшенню витрат на обслуговування.

В ході виконання магістерської роботи необхідно здійснити аналітичний огляд систем керування тяговими лінійними електродвигунами, визначити, для якої моделі модернізація буде найбільш доцільною, обрати вид електроприводу, здійснити розрахунок необхідної потужності тягових двигунів, розрахувати і обрати електричне обладнання, скласти математичну модель електромеханічного об'єкта, дослідити статичні і динамічні режими роботи електромеханічної системи, виконати синтез системи керування, провести техніко – економічне обґрунтування проекту.

**Об'єкт дослідження:** процеси електромеханічного перетворення енергії в лінійному асинхронному електроприводі.

**Предмет дослідження:** статичні та динамічні характеристики лінійних асинхронних двигунів з довгим індуктором.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Магістерську дисертацію виконано на кафедрі «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до плану підготовки магістрів.

**Мета роботи.** Метою магістерської дисертації є поглиблене вивчення властивостей лінійного асинхронного двигуна з довгим індуктором і коротким ротором на основі використання уточненої математичної моделі, розробка

системи автоматизованого лінійного електропривода транспортного засобу, дослідження його статичних та динамічних характеристик.

#### **Задачі роботи:**

1. Огляд стану проблеми та формулювання основних задач дослідження.
2. Розрахунок енергетичних та масогабаритних параметрів електроприводу візка.
3. Розрахунок параметрів лінійного асинхронного електродвигуна.
4. Складання математичної моделі лінійного асинхронного двигуна.
5. Розробка моделюючих програм та дослідження динамічних і статичних характеристик електромеханічної системи.
6. Синтез і розробка програми автоматизованого керування.

**Методи досліджень.** У роботі використані положення теорії електропривода та систем керування електроприводами, методи синтезу логічних схем, комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab/Simulink.

**Науково-технічна новизна** роботи полягає у розробці методики врахування особливостей лінійних асинхронних двигунів при моделюванні. Впровадження ЛАД у транспортних системах дозволить підвищити масогабаритні, експлуатаційні і технічні характеристики.

**Практична цінність.** Розроблена методика дослідження електромеханічних характеристик лінійного асинхронного двигуна з коефіцієнтом перекриття, розраховано технічні характеристики лінійного двигуна, розроблена система керування багатосекційним лінійним асинхронним двигуном.

#### **Перелік наукових публікацій:**

1. Теряєв В.І., Довбик А.Ю. Лінійний електропривод вагонетки атракціону. Матеріали Науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (ВНТУ-2020)», Вінниця, 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10385>

2. Теряєв В.І., Довбик А.Ю. Особливості математичного моделювання лінійного асинхронного двигуна з довгим індуктором. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". Київ, 2020.

**Апробація роботи** – "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". Київ, 2020.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків та переліку посилань. Повний обсяг дисертації становить 101 сторінок, 32 рисунка, а також 29 таблиць. Основний зміст роботи викладено на 7 сторінці.

## **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД**

В даному розділі розглянуті принцип роботи, варіанти конструктивних виконань лінійних асинхронних двигунів та електроприводів на їх основі. В якості перспективних застосувань лінійного електроприводу прийняті скипові підйомні установки та розважальні атракціони. Обгрунтована можливість і доцільність використання лінійного електроприводу для даних установок. В якості конкретного прикладу розглянута можливість впровадження лінійного електроприводу на атракціоні типу «Американські гірки».

### **1.1 Актуальність теми**

Скіпові підйомники вагонеток широко застосовуються на електричних станціях, в металургійному виробництві, гірничих підприємствах. Аналогічну функцію виконують підйомники вагонеток атракціонів. На даний момент, навіть не дивлячись на карантинні обмеження, тематичні парки розваг, частиною яких є атракціони, працюють і користуються популярністю [1, 2].

### **1.2 Призначення, конструкція та характеристики скіпових підйомників**

Скіповий підйомник - це грузопідйомний механізм, який складається із ковша або вагонетки, рейкових колій та електролебідки. Скіпові підйомники зазвичай застосовуються в системі подачі палива вугільних модульних котелень. Можлива організація подачі вугілля скіпом безпосередньо в бункер топки, або до загального паливного бункера котельні і потім транспортером подачі палива стрічковим або скребковим в топкові бункери котлів [3].

На рисунку 1.1 представлена схема скіпового підйомника.

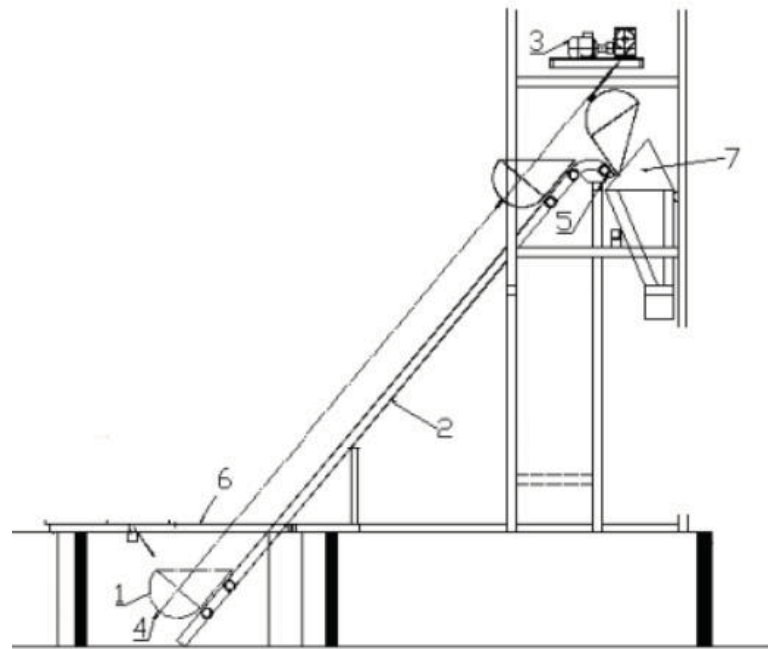


Рисунок 1.1 – Скіповий підйомник

Скіповий підйомник складається з рухомого бункера (вагонетки) - скіпа 1, виготовленого з листової сталі і переміщуваного по напрямних рейках 2 електролебідкою 3 через систему блоків 4. Бункер являє собою металевий короб, на задній стінці якого закріплені блоки. Скіп переміщується на ходових колесах по двох напрямних швелерів, розділених на збірки, скріплені поперечними ребрами. Верхня збірка має тупики 5, які є межею руху передніх коліс бункера.

Подальше просування бункера здійснюється шляхом його перевороту щодо осі передніх коліс. Тим самим відбувається вивід задніх коліс з напрямних швелерів і вивантаження вмісту скіпа. У складі вузла вугілляподачі скіповий підйомник грає наступну роль. Вугілля при відкритті затвора 6 потрапляє в скіп, що знаходиться в крайньому нижньому положенні. Після завантаження та закриття затвора змішувача скіп починає рух до проміжного кінцевого вимикача, тут він зупиняється для заспокоєння суміші і через певний період часу починає циклічне рух вгору до кінцевого положення, тим самим забезпечуючи пропорційне вивантаження вугілля за допомогою

завантажувальної воронки 7. Далі скіп повертається у вихідне нижнє положення для подальшого завантаження.

Керування механізмами здійснюється автоматично за рахунок системи автоматичного керування на основі мікроконтролера.

На рисунку 1.2 представлена кінематична схема скіпового підйомника.

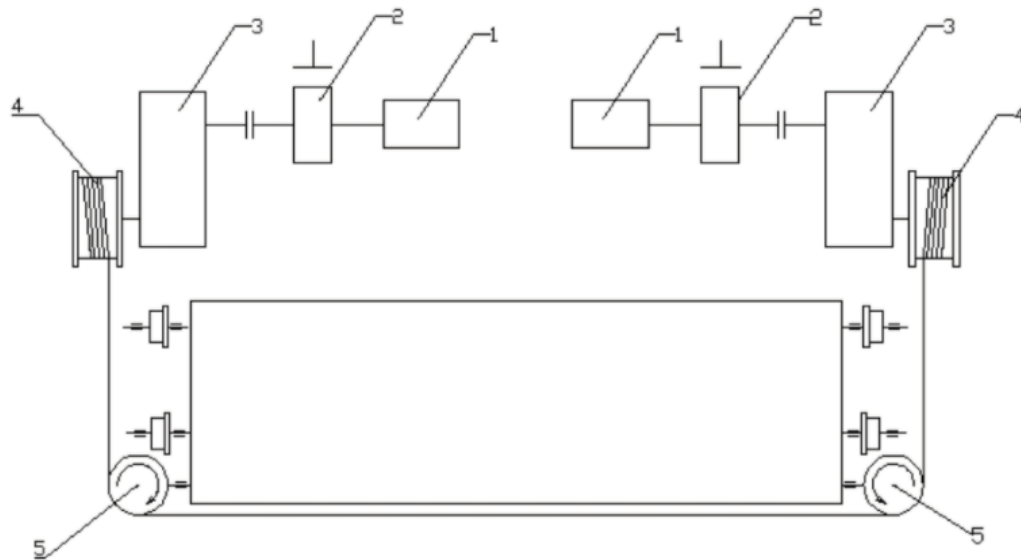


Рисунок 1.2 – Кінематична схема привода скіпового підйомника

В якості приводу скіпа використовуються два електродвигуни 1, кожен з яких через еластичну муфту з'єднаний з редуктором 3. На вихідному валу редуктора знаходиться барабан 4. Гальмування відбувається за допомогою двоколodкового гальма з приводом. Канат одним кінцем закріплений на першому барабані, потім проходить через блоки 5 і іншим кінцем закріплений на другому барабані. Така схема дозволяє виключити перекося скіпа при русі і зупинці, викликані не одночасною роботою гальмівних механізмів.

Електричне обладнання підйомника повинно забезпечувати надійну роботу при повторно-короткочасному режимі і великій частоті включень, в умови запилення приміщення, високої вологості повітря. У той же час до електроустаткування висуваються жорсткі вимоги безперебійності роботи, високої продуктивності, безпеки обслуговування та простоти експлуатації. На

механізмах підйому і пересування встановлюються аварійні обмежувачі ходу, що впливають на електричний ланцюг управління. Кінцеві вимикачі механізму підйому обмежують хід скіпа вгору і рух вниз.

Електричні кола і двигуни повинні бути захищені від коротких замикань і перевантаження максимальними струмовими реле. Так само має бути передбачена тепловий захист двигунів. У схемі керування повинно бути передбачено блокування, що оберігає двигуни від самозапуску при подачі напруги після перерви в електропостачанні. Для безпеки обслуговування повинно бути передбачено автоматичне відключення скіпового підйомника при відкритті захисних огорож. Гальмівні механізми повинні бути закритого типу, діючими при відключенні живлення. Виходячи з технологічного процесу пред'являються наступні вимоги:

- а) точна зупинка скіпа в нижньому положенні;
- б) синхронне обертання обох приводів при початку руху, при русі і зупинці скіпа. Асинхронність веде до нерівномірного намотування каната на барабани і виникнення небезпеки його обриву;
- в) збільшення продуктивності, тобто зменшення часу повернення скіпа в нижнє положення;
- г) плавне вивантаження вугілля зі скіпа, виключення роботи приводу в старт - стоповому режимі в верхньому положенні, що призводить до швидкого зносу обладнання [4].

За своїм технологічним процесом скіповий підйомник дуже схожий на вагонетку атракціону, так як підйом скіпу здійснюється під нахилом.

### **1.3 Скіпові підйомники вагонеток атракціонів**

Вагонетки на атракціонах типу «Американські гірки» не мають власного живлення. Натомість, вагонетка підтягується ланцюгом до першого піку. Накопичена потенційна енергія перетворюється в кінетичну енергію, коли вагонетка опускаються до наступного підйому. Кінетична енергія при цьому



зворотно перетворюється в потенційну енергію, коли поїзд знову рухається вгору до наступного піку. Цей пік має бути обов'язково нижчим, оскільки частково механічна енергія втрачається на подолання опору руху (тертя коліс об напрямні, аеродинамічний опір).

Зупинка в таких типах атракціонів зазвичай виконується гальмами в кінці робочого шляху, тобто коли вагонетка повертається на станцію. Зупинка відбувається або за рахунок сили тертя, або іноді використовуються магнітні гальма.

Крім того, є приклад використання гідравлічних приводів. Вагонетки в такому типі гірок приводяться в рух не гравітацією, а одним або декількома двигунами.

Сучасні вагонетки атракціонів мають однаковий базовий дизайн колісних збірок (рис. 1.3) [2]. Кожна збірка має три типи коліс: нижні 4, ходові 2 і бічні фрикційні 3. Така конструкція допомагає вагонетці 1 рухатися безпечно і плавно. Нижні колеса притискаються до низу рейки і не дозволяють вагонетці зійти з колії. Бічні фрикційні колеса притискають борти рейки з зовні або з середини, залежно від виробника колії. Ці колеса допомагають вагонетці залишатися в центрі двох рейок. Ходові колеса мають важливе призначення, оскільки несуть вагу поїзда, утримуючи вагонетку на колії.

Запуск гальма в кінці ланцюга є найпоширенішим методом зупинки поїзда з гірки, коли він повертається на станцію.

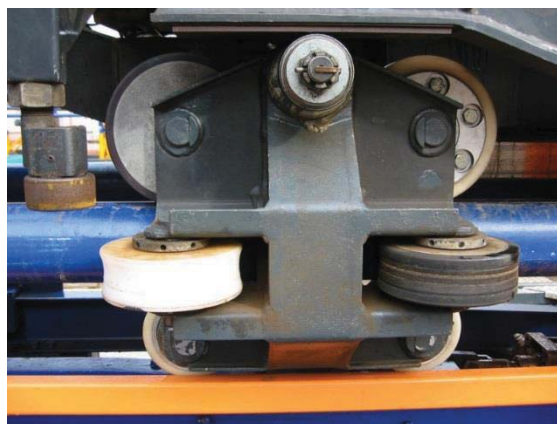


Рисунок 1.3 – Колісна збірка вагонетки атракціону

#### 1.4 Лінійні асинхронні електродвигуни

Лінійними називаються електродвигуни, які перетворюють електричну енергію у механічну енергію поступального руху за допомогою створення біжучого магнітного поля. Лінійні двигуни можуть бути асинхронними, синхронними і постійного струму, повторюючи за принципом своєї дії відповідні двигуни обертового руху.

На рис. 1.4 показано принцип утворення лінійного електродвигуна шляхом «розгортання» статора і ротора електричної машини обертової дії. Як видно з рисунка обидві машини мають певне число електромагнітних полюсів, в результаті взаємодії яких у випадку двигуна обертового руху виникає обертовий момент  $M$ , а у випадку лінійного двигуна – тягове зусилля  $F$ .

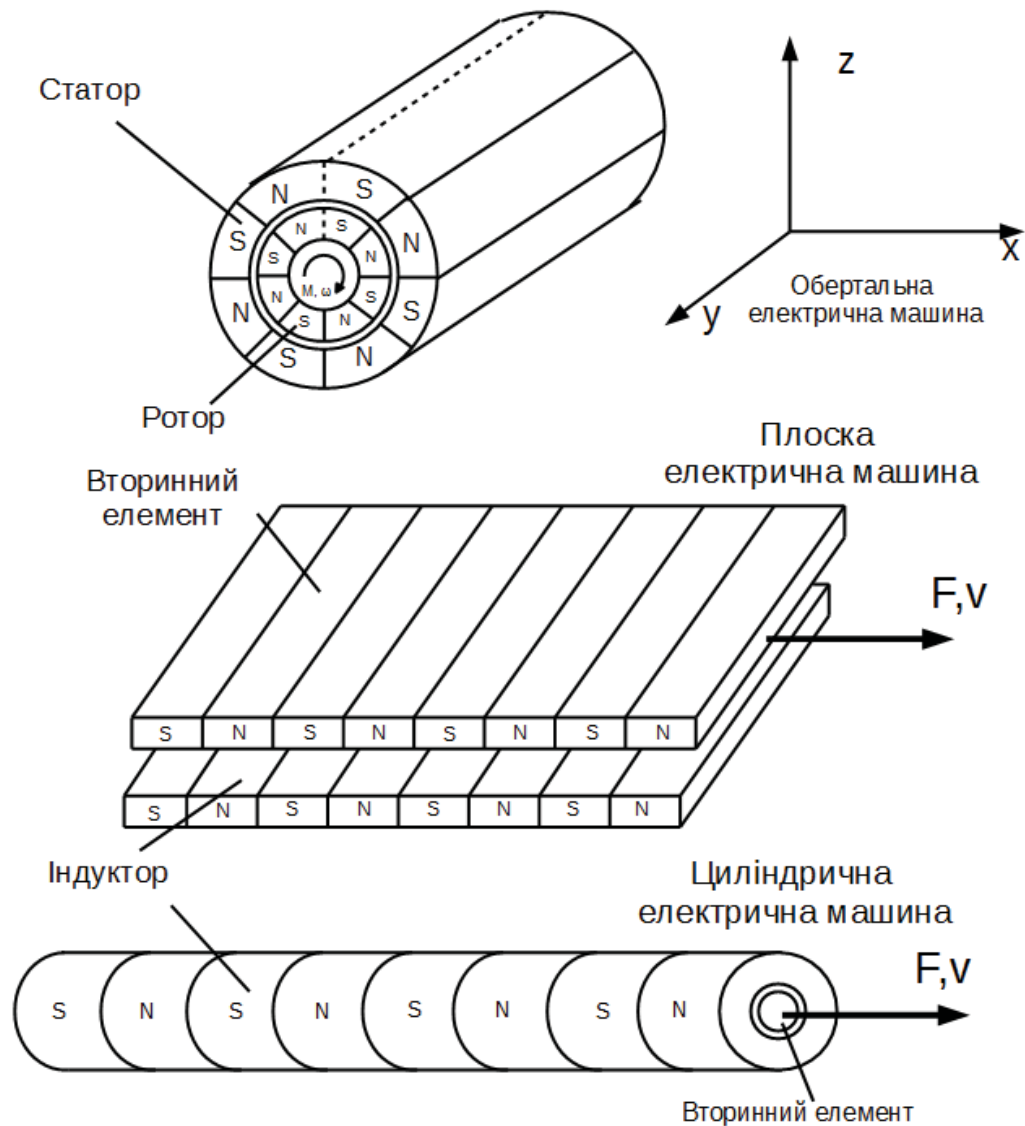


Рисунок 1.4 – Варіанти утворення ЛД із обертальної електричної машини

Особливістю лінійних двигунів (ЛД) є те, що рухомих в них може бути не лише ротор (вторинний елемент), але й статор (індуктор). Відповідно розрізняють два різновиди цих машин:

- з коротким вторинним елементом, який рухається відносно довгого нерухомого індуктора;
- з коротким індуктором; при цьому рухомих може бути як індуктор, так і вторинний елемент.

Практично всі лінійні електродвигуни мають свої прототипи по відношенню до електричних машин обертального руху, тому їх також можна

розділити на машини постійного та змінного струму. Найбільшого поширення набули лінійні асинхронні двигуни (ЛАД), які і розглядатимуться надалі. Уявлення про роботу лінійного асинхронного двигуна можна отримати, якщо подумки розрізати (рис. 1.5) статор 1 і ротор 4 з обмотками 2 і 3 звичайного асинхронного двигуна уздовж осі «О», котра паралельна твірної і розгорнути в площину, як це і показано на рисунку. Новоутворена «плоска» конструкція являє собою принципову схему лінійного двигуна. Якщо тепер обмотки 2 статора такого двигуна підключити до мережі змінного струму, то утворюється магнітне поле, вісь якого буде рухатися уздовж повітряного зазору зі швидкістю, пропорційною частоті напруги живлення і довжині полюсного поділку.

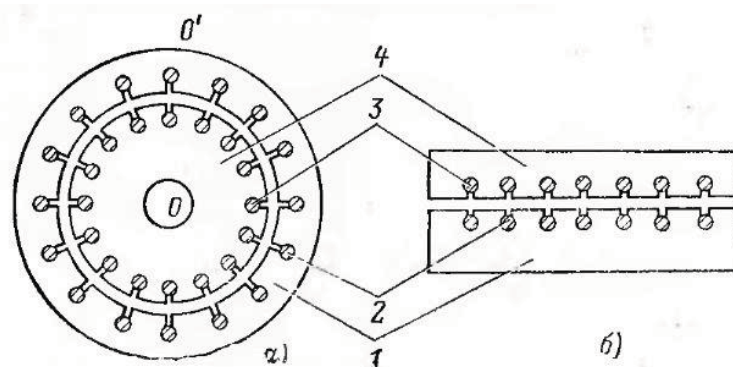


Рисунок 1.5 – Принцип побудови лінійного двигуна змінного струму

Це рухоме уздовж зазору магнітне поле перетинає провідники обмотки 3 ротора і індукуює в них ЕРС, під дією якої по обмотці почнуть протікати струми. Взаємодія струмів з магнітним полем призведе до появи сили, що діє в напрямку переміщення магнітного поля. Ротор - надалі будемо називати його вторинним елементом - під дією цієї сили почне рухатися з деяким відставанням (ковзанням) від магнітного поля, як і в звичайному асинхронному двигуні.

Представлена на рис. 1.5 конструкція являє собою лінійний двигун з однаковими розмірами статора і вторинного елемента. Крім такої конструкції, в залежності від призначення лінійного двигуна вторинний елемент може бути довшим статора (рис. 1.6, а) або коротше його (рис. 1.6, б). Такі двигуни

отримали відповідно назва двигунів з коротким статором і коротким вторинним елементом.

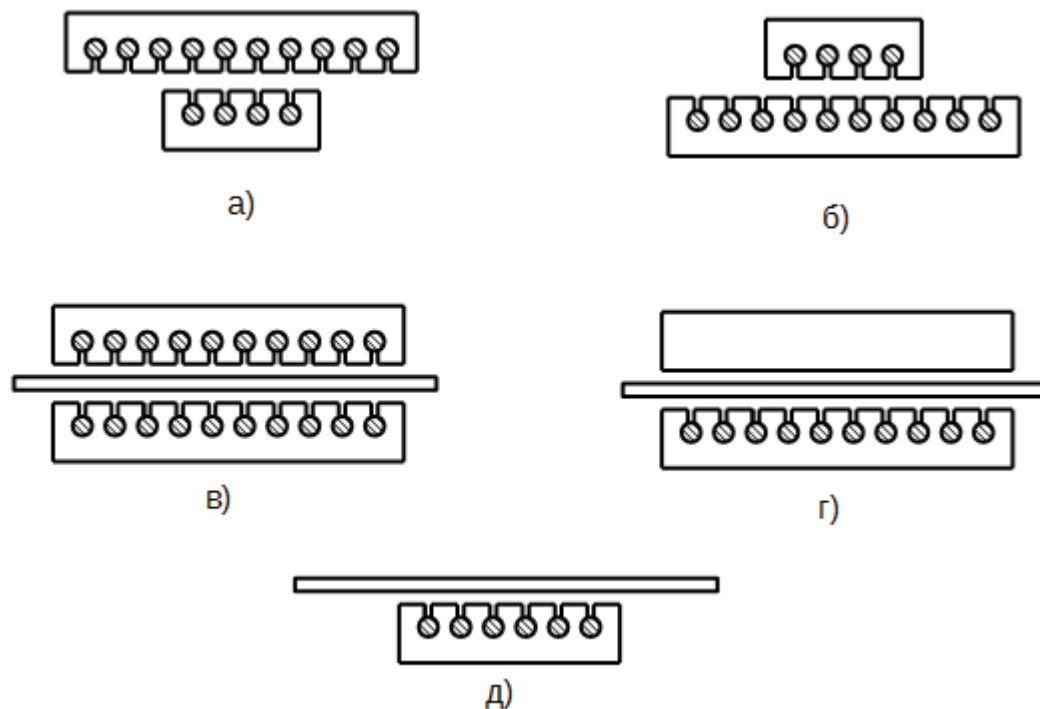


Рисунок 1.6 – Різновиди ЛД

Вторинний елемент (реактивна полоса) лінійного двигуна не завжди оснащується обмоткою. Часто, і в цьому одна з переваг лінійного асинхронного двигуна, в якості вторинного елемента використовується електропровідний металевий лист (смуга), як це показано на рис. 1.6, д. Вторинний елемент при цьому може розташовуватися також між двома статорами (рис. 1.4, в) або між статором і феромагнітним осердям (рис. 1.4, г). Двигун за конструктивною схемою, наведеною на рис. 1.6, б, отримав назву двигуна з одностороннім статором, зі схемою по рис. 1.6, в - з двостороннім статором і зі схемою по рис. 1.6, г - з одностороннім статором і осердям.

Вторинний елемент виконується з міді, алюмінію або сталі, причому використання немагнітного вторинного елемента передбачає застосування конструктивних схем з замиканням магнітного потоку через феромагнітні елементи, як, наприклад, на рис. 1.6, в, г. Деякого поширення набули складні вторинні елементи з прилеглими один до одного смугами з немагнітного і

феромагнітного матеріалу, при цьому феромагнітна смуга виконує роль частини магнітопроводу.

Принцип дії лінійних двигунів з вторинним елементом у вигляді смуги повторює роботу звичайного асинхронного двигуна з масивним феромагнітним або порожнистим немагнітним ротором. Обмотки статора лінійних двигунів мають ті ж схеми з'єднання, що і звичайні асинхронні двигуни, і підключаються зазвичай до мережі трифазного змінного струму.

Відзначимо, що лінійні двигуни дуже часто працюють в так званому оберненому режимі руху, коли вторинний елемент нерухомий, а рухається статор. Такий лінійний двигун, який отримав назву двигуна з рухомим індуктором, знаходить, зокрема, широке застосування на електричному транспорті [5].

Варіанти конструктивного виконання ЛАД показані на рис 1.7. На індукторі міститься розподілена обмотка. В одноіндукторних ЛАД (рис. 1.7, а, б) вторинний елемент може бути відокремлений від зворотного магнітопроводу (рис. 1.7, а) або суміщений з ним (рис. 1.7, б). В двоіндукторних ЛАД необхідність у зворотному магнітопроводі відсутня (рис. 1.7, в). Вторинний елемент виконується у вигляді смуги з алюмінію, міді чи сталі [6].

Лінійні електричні машини можуть мати плоске і циліндричне виконання. Складовими частинами електродвигуна є індуктор і вторинний елемент. Індуктор плоского двигуна складається з магнітопроводу і обмотки. Магнітопровід електродвигуна набирається з окремих секцій, які шихтуються на складальних призмах. потім магнітопровід пресується і скріплюється за допомогою натискних плит. Секції обмотки електродвигуна укладаються в пази магнітопроводу і з'єднуються між собою за заданою схемою. Для механічного захисту і герметизації індуктор заливається спеціальним компаундом. В окремих випадках лобові частини обмотки закриваються захисним кожухом. Природне охолодження індуктора здійснюється через вентиляційні жалюзі

захисного кожуха. В робочих режимах електродвигуна з інтенсивним виділенням тепла застосовуються системи примусового охолодження

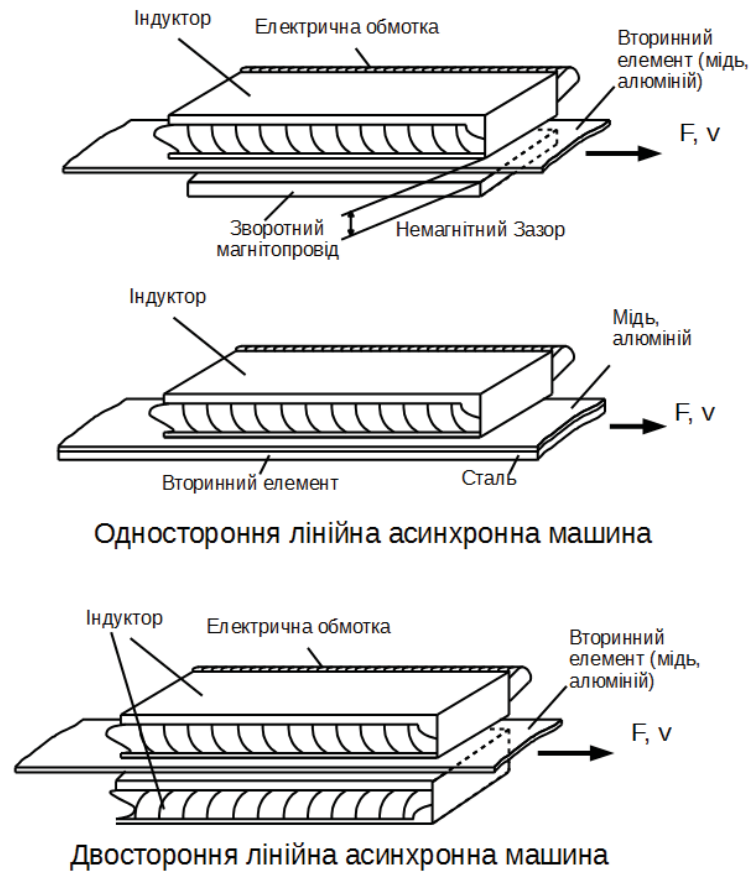


Рисунок 1.7 – Конструктивне виконання ЛАД

Плоскі лінійні електродвигуни можуть бути односторонніми і двосторонніми. Вторинний елемент одностороннього електродвигуна зазвичай виконується у вигляді сталевій смуги з алюмінієвим або мідним покриттям. В двосторонньому електродвигуні вторинний елемент являє собою струмопровідну смугу. Застосовуються і інші конструкції вторинних елементів, в тому числі з короткозамкненими і фазними обмотками. В виконавчих пристроях і механізмах зворотно-поступального руху переважно застосовуються циліндричні лінійні електродвигуни, в основу конструкції яких покладено модульний принцип. Магнітопровід електродвигуна складається з окремих сталевих шайб. Котушки обмотки намотують на каркаси і поміщають в пази шайб магнітопроводу. Утворюються монтажні модулі, з яких



набирається індуктор електродвигуна потрібної довжини. Необхідний повітряний зазор між індуктором і вторинним елементом підтримується з допомогою підшипника ковзання запресованого в торцеву кришку, конструкція фіксується кільцями. Вторинний елемент циліндричного лінійного електродвигуна виконується у вигляді стрижня або труби з струмопровідним покриттям. Застосування короткозамкненого вторинного елемента підвищує тягово енергетичні показники електродвигуна. Впровадження лінійних електродвигунів в різне технологічне обладнання супроводжується удосконаленням існуючих та розробкою нових конструкцій цього типу електричних машин [7].

Переваги лінійних двигунів:

1) прямий привод при поступальному русі. Тоді як обертальний момент, що виробляється обертовими електродвигунами, повинен бути перетворений на поступальну силу механічними шестернями та оборотними колесами, лінійні двигуни можуть безпосередньо виробляти поступальну електромагнітну силу. Таким чином, привод вагонетки стає надійнішим і не матиме зчеплення між залізною рейкою та колесами. Слід відмітити, що для вагонетки атракціону колеса необхідні в цілях безпеки, так як кут нахилу гірки постійно змінюється і вагонетка може навіть опинитися перевернутою по відношенню до землі. З цього випливає, що лінійні приводи дозволяють використовувати значно більш гнучкі профілі колій з вертикальними, а також горизонтальними крутими поворотами. Крім того, більш надійне прискорення без зчеплення полегшує застосування автоматичного гальмування.

2) більше прискорення та гальмування. Оскільки прямі лінійні приводи не мають обмежень в зчепленні між колесами і рейками, максимальне прискорення може бути отримане за рахунок збільшення потужності та ефективності гальмування, ніж у звичайних поїздів. Профіль вертикальної доріжки може мати більший градієнт ніж 3,5%.

3) відносно високий ККД.



- 4) можливість пристосування до рельєфу, оскільки нерухома сторона електричної машини розміщена на колії.
- 5) можливість знизити габарити, масу і вартість електроустаткування.

Поряд з перерахованими перевагами лінійні двигуни мають ряд істотних недоліків:

- 1) відносно низькі коефіцієнти корисної дії та потужності у порівнянні з електродвигунами змінного струму обертального типу. У лінійних двигунах величина повітряного зазору, як правило, набагато більша, ніж у машин обертальної дії. Тому значення коефіцієнтів потужності і ККД у них виявляються значно меншими. Результати розрахунків і експериментальних досліджень, проведених різними авторами, наприклад дослідження ЛАД для потягу [8], показують, що ККД і коефіцієнт потужності лінійних двигунів вдвічі менші відповідних величин двигунів обертальної дії. Тому результуючий ККД установки з двигуном обертальної дії (не говорячи вже про коефіцієнт потужності), з урахуванням ККД передачі, буде, як правило, значно вище, ніж ККД лінійного двигуна.
- 2) немає можливості зменшити швидкість механічними передачами: вимагається велика пряма тяга.
- 3) Тривимірні сили взаємодії статора і ротора.

Магнітні поля в тягових лінійних двигунах відрізняються від магнітних полів обертових асинхронних двигунів в силу ряду обставин. Одні з них пов'язані з різницею в параметрах (наприклад, в десятки разів більший зазор в магнітній системі лінійного двигуна) і відображаються на кількісну сторону явищ, інші пов'язані з особливостями конструкції лінійного двигуна і викликають нові фізичні явища в машині. Відзначимо найважливіші з них.

Індуктор тягового лінійного двигуна має кінцеву довжину в напрямку біжучого магнітного поля, яке виникає на одному і зникає на іншому кінці сердечника індуктора. Цю особливість характеризують як "розімкнення" магнітної системи лінійного двигуна. Вона, зокрема, викликає асиметрію струмів в обмотках індуктора і пульсуючу складову магнітного поля індуктора.

Пульсацію магнітного поля можна зменшити за допомогою компенсуючих котушок або повністю усунути за допомогою нової конструкції магнітної системи лінійного двигуна. Це явище називається первинним поздовжнім крайовим ефектом.

Окремі ділянки реактивної шини послідовно входять в магнітне поле рухомого індуктора і потім виходять з цього поля. Процеси "входу-виходу" викликають ряд нових, характерних і непереборних явищ, сукупність яких називають вторинним поздовжнім ефектом. Струми, що наводяться в ділянках реактивної шини, визначаються зміною магнітних потоків, зчеплених з контурами струмів на цих ділянках. Зміна в потокозчепленні викликається як переміщенням поля (ковзанням) індуктора відносно шини зі швидкістю  $V = SV$ , так і процесами "входу" ділянок реактивної шини в магнітне поле індуктора і подальшим їх "виходом" з цього поля. Відповідно з цим струми в шині можуть бути поділені на струми ковзання, що створюють тягові зусилля лінійного двигуна, і вихрові струми, пов'язані з встановленням і зникненням магнітного поля в ділянках шини при їх проході через зазор індуктора.

Магнітні поля індуктора поділяються на головне поле і на бічні і торцеві поля розсіювання. Останні є пульсуючими полями. Явище вторинного крайового ефекту полягає в тому, що в провідному вторинному елементі не може відразу, миттєво виникнути магнітний потік. У вторинному елементі виникає миттєво електричне поле, і струми, створювані цим полем, прагнуть створити зустрічні потоки, в результаті чого на вході різко падає індукція. Аналогічна картина на виході, тільки там струми у вторинному елементі намагаються перешкоджати зменшенню потоку, і магнітне поле виноситься за кінець індуктора. Це явище виражається тим яскравіше, чим вище синхронна швидкість.

Існують також крайові поперечні ефекти, які проявляються в поперечному напрямку двигуна, так як ширина сердечника обмежена. Крайові поперечні ефекти існують і в обертових машинах, але вони менш значні. По-перше, в обертовому двигуні струм проходить по провідникам, розташованим в

роторі (за деяким винятком), а не в загальній масі ротора. У роторі асинхронного двигуна активний струм проходить по струмопровідних стрижнях, а зворотний - по короткозамкненим кільцям. Суцільний ротор лінійного двигуна не дозволяє відокремити активні струми від зворотних. По-друге, ширина ротора і статора в обертовому двигуні однакова. У лінійному двигуні ротор може бути ширшим, ніж статор, мати ту ж або меншу ширину, ніж статор.

Зворотні струми протікають і в тих зонах ротора, які розташовані за статором, якщо статор вужче, ніж ротор. Якщо ж в силу конструктивних причин статор ширий, ніж ротор, то зворотні струми, природно, проходять в частинах ротора, що знаходяться в активній зоні статора. Потік збудження погано використовується, і це явище призводить до удаваного збільшення вторинного опору. Цей ефект прагне збільшити пускове зусилля, але номінальний режим роботи двигуна стає менш ефективним [9].

Лінійні електродвигуни застосовуються там, де вони спрощують конструкцію, підвищують продуктивність машин і устаткування, або в тих випадках, коли використання ротаційних електродвигунів за їх характеристиками неможливо. Застосування лінійних електродвигунів найбільш перспективно в промисловому і пасажирському транспорті. У конвеєрних поїздах індуктори електроприводу розташовані уздовж рейкового шляху, вторинний елемент електродвигуна знаходиться на рухомому складі. Такі поїзди зручні при транспортуванні вугілля, руди та будівельних матеріалів. На прикладі системи міського естакадного пасажирського транспорту показаний інший варіант виконання лінійного електродвигуна, де вторинний елемент встановлений уздовж шляху у вигляді струмопровідної вертикальної смуги. А індуктори встановлені в рухомому вагоні. Лінійні асинхронні електродвигуни застосовуються також в приводах різних виконавчих механізмів і пристроїв. У приводах роз'єднувачів тягових підстанцій циліндричних лінійний електродвигун істотно спрощує конструкцію, підвищує швидкодію і експлуатаційну надійність обладнання.

У ряді випадків, вторинним елементом двигуна може бути і деталь робочого механізму. Привод поворотного столу маніпулятора здійснений на базі плоских лінійних електродвигунів, що забезпечує високу точність кутового позиціонування столу і істотно спрощує механічну частину пристрою. В окремих випадках, лінійні асинхронні електродвигуни можуть ефективно виконувати відразу кілька цільових функцій. Наприклад, в ливарній карусельній машині привод реалізований на лінійних електродвигунах плоского виконання. Він може переміщувати і при технологічній необхідності підігрівати ложниці. Коефіцієнт корисної дії таких приводів значно вище, ніж ККД приводів з однієї цільової функцією.

Принцип роботи лінійного асинхронного електродвигуна може бути використаний при створенні інших електромагнітних пристроїв, наприклад в сепараторах кольорових металів. Лінійні електродвигуни застосовуються в різних системах внутрішньоцехового транспорту. Основними перевагами лінійних електродвигунів є можливість отримання безпосереднього прямолінійного руху, великих швидкостей і прискорень, простота конструкції, безшумність і надійність роботи. Розвиток мікропроцесорної техніки і розробка нових засобів керування дозволяють постійно розширювати області ефективного застосування лінійних електродвигунів [10].

### 1.5 Застосування ЛАД на транспорті

ЛАД широко використовуються в пасажирському транспорті на протязі багатьох років [11, 12]. ЛАД публічного транспорту і атракціонів мають багато спільного, тому для кращого розуміння технології і задля вивчення можливих інженерних рішень для візка атракціону, слід ознайомитись з ЛАД рейкового транспорту (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Варіанти підвісок з лінійними двигунами

Система	Підвіска	Опора	Привод	Місце	Максим	Статус
---------	----------	-------	--------	-------	--------	--------

				розміщення індуктора	альна швидкість	
M-Bahn (Німеччина)	Гумові колеса і постійні магніти	Гумові колеса	Лінійний синхронний двигун	На землі	40 км/год	В музеї
Birmingham people mover (Великобританія)	Електромагнітна підвіска	Електромагніти	Лінійний асинхронний двигун	На поїзді	<70 км/год	В музеї
Linimo (Японія)	Електромагнітна підвіска	Електромагніти	Лінійний синхронний двигун	На поїзді	100 км/год	Працює в Японії
Transrapid (Німеччина)	Електромагнітна підвіска	Електромагніти	Лінійний синхронний двигун	На землі	>400 км/год	Працює в Китаї
JR-Maglev (Японія)	Електродинамічна підвіска	Електроди намічне керування (Null-flux)	Надпровідний Лінійний синхронний двигун	На землі	>500 км/год	В розробці в Японії
Innovia metro, Japanese Linear Metros	Залізне колесо/рейка	Залізне колесо/рейка	Лінійний асинхронний двигун	На поїзді	>100 км/год	Працює в багатьох країнах

### 1.6 Застосування ЛАД в вагонетках атракціонів

У 1996 році компанія Premier Rides of Maryland принципово змінила ринок американських гірок, представивши дві нові гірки, обидві названі «Outer Limits: Flight of Fear» (у перекладі «Поза меж: Політ страху»). Коли вони вперше відкрилися на Кінг-Айленді Парاماунту та Королівському домініоні Парاماунта, вони представили нову технологію: лінійні асинхронні двигуни для запуску вагонетки. До 1996 року при запуску американських гірок використовували троси, шківи та величезні противаги. Такі системи запуску, створені компанією Schwarzkopf, не лише ускладнювали технічне обслуговування, але швидкість запуску та інтенсивність були дуже обмеженими, досягаючи трохи менше 96 км/год приблизно за 6 секунд.

The Outer Limits: Flight of Fear досягали подібних максимальних швидкостей, як у старих моделей атракціонів, але ця швидкість досягалася всього за 3 секунди. Ці атракціони спровокували нову хвилю запуску американських гірок багатьох різних виробників, включаючи перші американські гірки, які здолали бар'єр 160 км/год. Технологія використовується не тільки для запуску вагонеток з високою швидкістю, але вона також використовувалась для імітації підйомних пагорбів з ланцюговим приводом і повільного переміщення поїздів по кімнатах, таких як кімнати жахів.

Терміни лінійні асинхронні двигуни (ЛАД) та синхронні лінійні двигуни (ЛСД) іноді використовуються як взаємозамінні, але технології відрізняються. ЛАД використовують електричні "двигуни", які створюють рухомі магнітні поля, які приводять у дію струмопровідні або магнітні пластини, з'єднані з потягом. ЛСД вмикаються і вимикаються, коли пластини, що містять змінні полюсні магніти, рухаються по колії. Ця технологія полягає у встановленні часу включення магнітів у потрібний час, щоб фактично перемістити поїзд у бажаному напрямку. Дана концепція використовувалась у пасажирських поїздах, трамваях аеропортів та Disney's Peoplemover. Однак, спочатку такі технології було важко реалізувати. Сучасні датчики та комп'ютерні системи врешті-решт вирішили проблеми.

Початкові конструкції атракціонів були досить нетрадиційними. Два атракціони Outer Limits були ідентичними, і ще два клони були побудовані на відкритому повітрі в Six Flags America (Joker's Jinx) (рис. 1.8) і Six Flags Fiesta Texas (Poltergeist). Більшість з ЛАД і ЛСД, які використовувались для запуску вагонетки, побудовані наприкінці 90-х, були простими. Це атракціони типу Mr. Freeze (Six Flags Over Texas та Six Flags St. Louis) та Batman and Robin: The Chiller (Six Flags Great Adventure).





Рисунок 1.8 - Six Flags America (Joker's Jinx)

У 1997 році у тематичному парку Six Flags Magic Mountain було створено найвищий атракціон у якому використовувався ЛСД - Superman: The Escape (рис. 1.10). Даний атракціон мав висоту 126 метрів, а вагонетка досягала швидкості 160 км/год. Таким чином він майже 5 років утримував світовий рекорд висоти та швидкості, але експлуатаційні витрати (насамперед електроенергія) та погане технічне обслуговування змусили його працювати лише на половину потужності, поки не було проведено ремонт 2011 році.

Лінійний двигун дозволяє досягти прискорення 2G на початку поїздки. Тягове зусилля для прискорення транспортного засобу забезпечується полем, генерованим постійними магнітами на транспортному засобі або полем, що створюється струмом в обмотках на колії. Прискорення пасажирів складає до 160 км/год за 5 с. Вони відчувають силу 4,5 G при заокругленні згину і 6,5 G з невагомістю при піднятті на висоту 126 метрів (рис. 1.9). Вся поїздка триває лише 60 с [13].

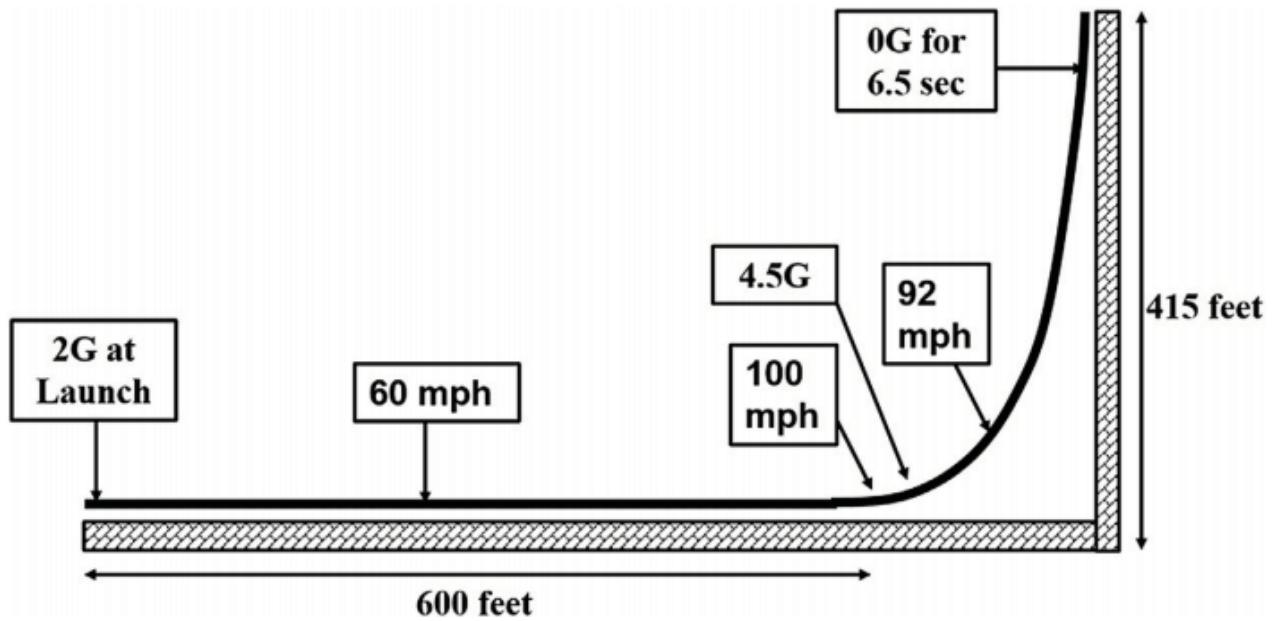


Рисунок 1.9 – Перевантаження, швидкості, та габарити Superman: The Escape



Рисунок 1.10 - Superman: The Escape

У 1998 році Paramount's Kings Dominion створив атракціон, що до цих пір залишається одним з найбільш унікальних - Volcano: The Blast Coaster (рис.



1.11). Він був першим перевернутим атракціоном, і з максимальною швидкістю 113 км/год і досі є найшвидшим у світі перевернутим атракціоном.

Крім того, Intamin створив низку перевернутих вагонеток з ЛАД (наприклад V2 в Six Flags Discovery Kingdom).



Рисунок 1.11 - Volcano: The Blast Coaster

У 2007 році запуском Maverick у парку розваг Cedar Point було продемонстровано універсальність ЛАД та ЛСД. Система цікава тим, що в ній застосовуються як ЛАД так і ЛСД. Маршрут починається з повільного підйому на пагорб, який насправді являє собою серію ЛСД, які приводять поїзд у рух на вершину схилу, подібно до традиційного підйому ланцюга. Після ряду підйомів, спусків та обертань потяг зупиняється в тунелі безпосередньо під станцією. Потім набір ЛАД запускає поїзд до 113 км/год і здійснює серію високошвидкісних маневрів, які були настільки екстремальними, що їх довелося позбутися, оскільки це перевищувало людську терпимість.

Однак не всі атракціони з ЛАД і ЛСД є швидкісними. Насправді багато операторів парків включають цю технологію в більш сімейні поїздки. Revenge of the Mummy (Universal Studios Orlando та Hollywood) використовує цю

технологію, щоб повільно рухати вагонетки протягом першої половини поїздки, що дуже нагадує традиційну їзду у кімнаті страху, а потім піднімає поїзд на пагорб з якого вагонетка опускається униз. Back Lot Stunt Coasters використовують ЛАД для менш інтенсивних запусків з максимальною швидкістю 64 км/год, тоді як Cheetah Hunt використовує три різні набори ЛСД, щоб не тільки підняти вагонетку на 30 метрову вершину, але щоб надати йому прискорення через криві, що обіймають місцевість, зі швидкістю до 97 км/год [14].

Розташований в Kings Dominion в місті Досуелл, штат Вірджинія, США. Intimidator 305 був відкритий для відвідувачів 2 квітня 2010 року як чотирнадцятий атракціон подібного типу в парку. З висотою 93 м і максимальною швидкістю 145 км/год, це другий Giga Coaster (вищий 91 м) побудований у Північній Америці, після Millennium Force в Cedar Point. Інвестиція у 25 мільйонів доларів стала найбільшою за всю історію парку. Атракціон, присвячений гонкам, названо на честь водія NASCAR Дейла Ернхардта, якого широко називали "Залякувач"(Intimidator).

Intimidator 305 має перше падіння на 91 м (300 футів), яке досягає максимального кута спуску ( $85^\circ$ ). Унікальна будова підйомного пагорба використовує лише дві основні точки опори на вершині пагорба. Його загальна висота також перевищує оглядовий майданчик найвищої споруди парку - пам'ятки Ейфелевої вежі. Після лише одного сезону експлуатації, атракціон зазнав капітальної реконструкції свого першого повороту, щоб зменшити кількість Greyout (короткочасних втрат зору [15], які деякі пасажири відчували на їзді.

Деякі пасажири відчували проблеми відразу після першого спуску через велике перевантаження. Пасажири повідомляли про симптоми посиніння або запаморочення, короткочасну втрату зору або свідомості залежно від тяжкості. Щоб зменшити кількість таких випадків, Kings Dominion зменшив максимальну швидкість вагонети тимчасово встановивши гальма на першому спуску. Протягом наступного міжсезоння перший поворот атракціону був

перероблений, що призвело до більш широкого радіусу повороту та зменшення перевантаження. Основна модифікація дозволила їм зняти гальмівні механізми на першому спуску, повернувши їзду до початкової максимальної швидкості 145 км/год.

Intimidator 305 був описаний як суміш Millennium Force та Maverick, обидва розташовані в Cedar Point. Перший пагорб спроектовано подібно до першого пагорбу Millennium Force. Слідом за підйомним пагорбом проходять низькі до землі щільні повороти та пагорби, схожі на Maverick. У їзді є шість горбів та три високошвидкісні повороти на рівні землі. Загальна довжина складає 1554 м.

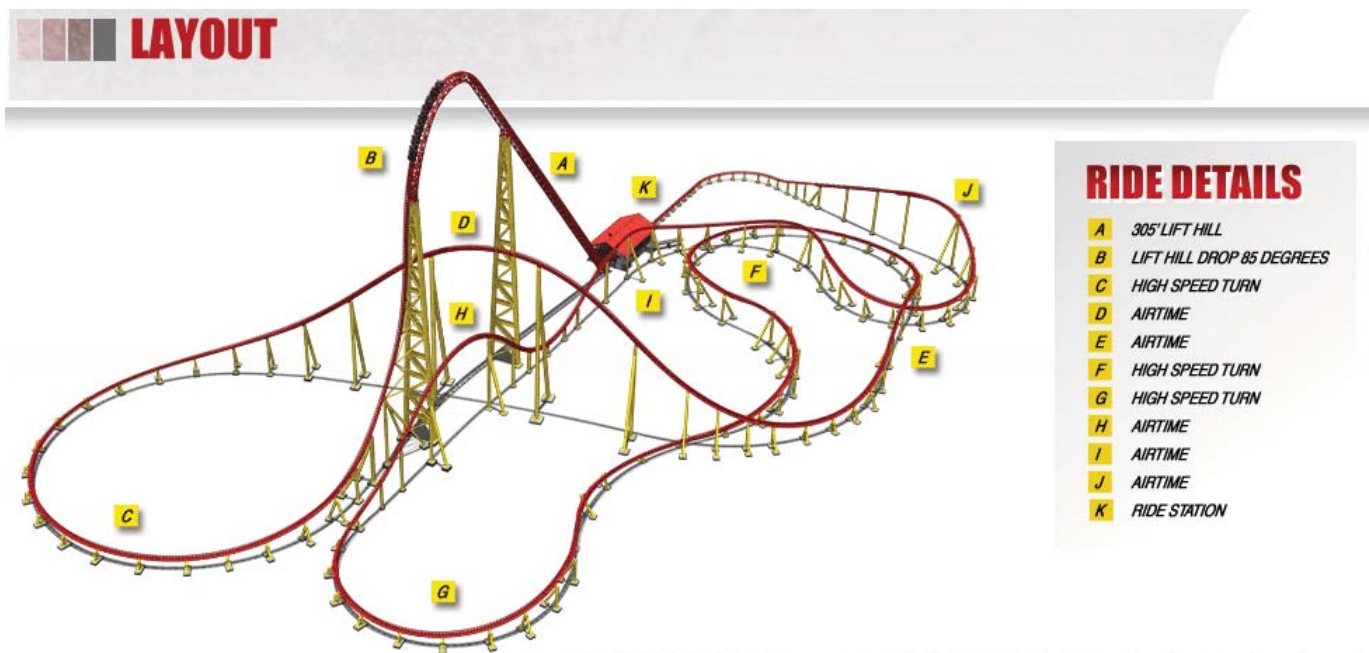


Рисунок 1.12 – Макет Intimidator 305

Канат закріплюється у середній секції вагонетки. Як тільки вагонетка починає рух, вона піднімається на 45-градусний підйомник зі швидкістю 21,2 км/год до максимальної висоти 93 м. Як тільки вагонетка досягає вершини, вона спускається вниз під кутом 85°, досягаючи швидкості до 145 км/год. Падіння досить круте і досить різке, щоб пасажирів викидало зі своїх місць у обмежувачі, так що під час майже вертикального падіння на висоті 91 м вони відчували, ніби можуть випасти з вагонетки. Вагонетка повертає вправо у 270-

градусний поворот перед тим, як піднятися на 46-метровий пагорб. Потім вагонетка спускається, перш ніж увійти в інший швидкісний поворот і маневрує 3 різкими поворотами перед входом у фінальний швидкісний поворот. Після цього вагонетка піднімається на інший пагорб із гальмами, за яким слідує ще один пагорб перед тим, за яким слідує останній поворот, після якого слідує зупинка магнітними гальмами. Один цикл поїздки триває близько 3 хвилин [16].

У Intimidator 305 є дві вагонетки. Кожна вагонетка має вісім секцій по 4 пасажирів кожна, що дозволяє перевозити 32 пасажирів на вагонетку [17].

Конструкція підйомного пагорба для Intimidator 305 унікальна тим, що підйомний пагорб має лише три точки опори. Баланс колії складається з нової колії double-spine track від Intamin (рис. 1.12), яка забезпечує довші прольоти з меншою кількістю опор, особливо на кривих гребеня. Їзда має падіння на 85 градусів[18].



Рисунок 1.13 - Double-spine track

Таблиця 1.2 – Параметри Intimidator 305

Система підйому	канат
Висота	93 м
Довжина	1554 м
Максимальна швидкість	145 км/год

Максимальний кут нахилу	85 °
Вагонетки	2 вагонетки по 8 секцій. По 2 людини на 1 ряд. Всього 32 людини на вагонетку

### 1.7 Вимоги до лінійного електроприводу і системи автоматизації

До лінійного електроприводу і системи автоматизації висуваються наступні вимоги:

- плавність розгону до  $5\text{ м/с}^2$ ;
- плавність гальмування до  $6\text{ м/с}^2$ ;
- обмеження максимальної швидкості до  $6\text{ м/с}$ ;
- струмовий захист;
- захист від зникнення живлення;
- керування механічними гальмами в випадку аварійних режимів.

### Висновки до розділу 1

1. Проведений аналітичний огляд в області лінійних двигунів показав доцільність застосування лінійного електроприводу в скіпових підйомних установках і, в тому числі, на атракціонах типу «Американськи гірки».
2. Сформульовані вимоги до лінійного електроприводу, які включають вимоги до швидкості руху, максимального прискорення, плавного пуску, мережі живлення, струмовий захист, захист від обриву живлення а також вимоги до автоматизації, що дає змогу здійснити проектування лінійного електроприводу і системи керування.

3. Обрано вид ЛАД з довгим нерухомим індуктором і короткою реактивною половою. Розроблена конструкція вагонетки для спільного використання з лінійним електроприводом.



## **2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РОЗРАХУНОК ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА**

### **2.1 Конструктивні рішення**

Для визначення можливості використання лінійного електропривода вагонетки атракціону розглянемо конструктивне рішення з використанням найбільш прийнятного для даного застосування лінійного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, укладеним вздовж шляхової структури і короткою реактивною половою, закріпленою на дні вагонетки (див. рис. 2.1). Індуктор ЛАД перетворює електричну енергію у механічну енергію поступального руху за допомогою створення індуктором (статором) 5 біжучого магнітного поля. На індукторі міститься розподілена обмотка 6. Вторинний елемент складається з реактивної полоси 7 та сталевого зворотного магнітопроводу 8. Реактивна полоса виконується у вигляді смуги з алюмінію чи міді. При подачі струму в обмотку індуктора 6 в зазорі ЛАД утворюється біжуче магнітне поле, внаслідок дії якого на вторинний елемент в останньому наводиться ЕРС і утворюється струм у вигляді короткозамкнених контурів. В результаті взаємодії струму вторинного елемента 7 з полем індуктора виникає тягове зусилля, яке забезпечує переміщення вторинного елемента відносно індуктора у необхідному напрямку. Перевагою лінійних електродвигунів є простота здійснення поступальних переміщень, можливість передачі силової дії на об'єкт керування без механічного контакту з ним.

В запропонованій конструкції приводу вагонетки передбачається установити індуктор ЛАД вздовж рейк на ділянці підйому, а вторинний елемент закріпити на дні вагонетки, як це показано на рис. 2.1 та рис. 2.2. Задачею лінійного електроприводу буде здійснити підйом вагонетки на пік траси руху.

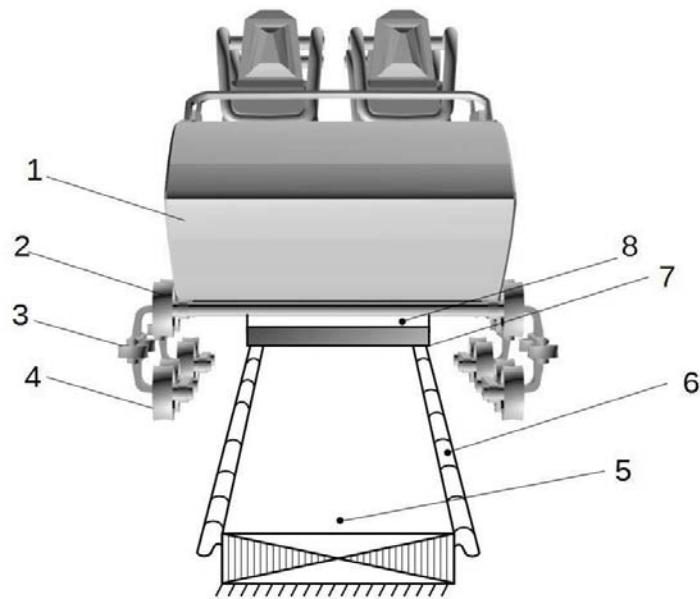


Рисунок 2.1 - Конструкція вагонетки з ЛАД

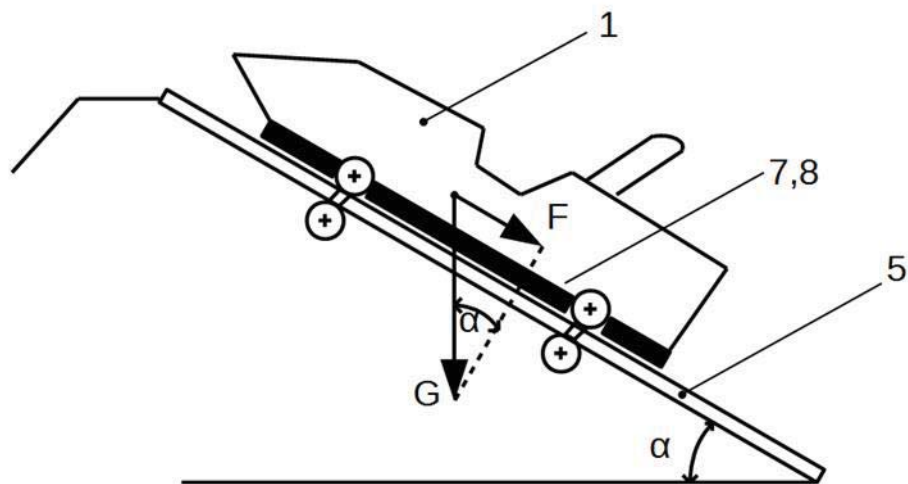


Рисунок 2.2 - Ділянка підйому вагонетки з ЛАД

У випадку використання лінійного електроприводу може бути змінена сама концепція атракціону. Відпадає обов'язкова умова того, щоби всі наступні пагорби атракціону були нижчими попередніх. Це може бути досягнуто встановленням додаткових допоміжних секцій індукторів ЛАД, які «додають» кінетичної енергії вагонетці і забезпечують подолання чергового підйому. Тобто, атракціон стає умовно «безкінечним».



Проведемо розрахунок параметрів ЛАД на основі інженерної методики [19]. В якості базового варіанту приймемо плоский одноіндукторний ЛАД з нерухомим індуктором. Такий вибір конструкції ЛАД обумовлений відсутністю необхідності струмопідводу до рухомої вагонетки та обмеженням простору для розташування на ній індуктора.

Вихідні дані приймаємо наступними:

- номінальна фазна напруга двигуна  $U_{\text{ФН}}=220 \text{ В}$ ;
- номінальна швидкість руху  $V=5 \text{ м/с}$ ;
- номінальна частота живлення двигуна  $f_{\text{Н}}=50 \text{ Гц}$ .
- ширина індуктора та реактивної полоси  $b=0,5 \text{ м}$ ;
- повітряний зазор між ЛАД і полозою  $\Delta=5 \text{ мм}$ ;
- довжина вагонетки  $L = 3 \text{ м}$ ;
- вага людей  $G_{\text{л}} = 320 \text{ кг} = 3136 \text{ Н}$ ;
- вага вагонетки  $G_{\text{м}} = 400 \text{ кг} = 3920 \text{ Н}$ ;

Для попереднього вибору потужності двигунів величину  $F_{\text{с}}$  зазвичай визначають тільки з врахуванням основних сил опору руху

$$F_{\text{с}} = F_{\text{тр}} \pm F_{\text{у}}$$

де  $F_{\text{тр}}$  сила опору від тертя в ходових частинах;

$F_{\text{у}}$  - протидія руху внаслідок нахилу шляху.

В кранових механізмах нормальну до поверхні силу (силу тиску колеса на цю поверхню, частіше за все рейки) створюють сили ваги вантажу  $G_{\text{гр}}$  і механізму (крана, візка)  $G_{\text{м}}$ . Відповідно, сила опору від тертя в ходових частинах кранових механізмів на прямолінійному нахиленому відрізку шляху з кутом нахилу  $\beta$  становить

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{р}} (G_{\text{л}} + G_{\text{м}}) \frac{\mu_{\text{ц}} d_{\text{ц}} + 2f}{D_{\text{к}}} \cos \beta = 1.1 (3136 + 3920) \frac{0.01 \cdot 50 + 2 \cdot 0.4}{300} \cos 45^\circ = 24 \text{ Н}. \quad (2.27)$$

Де  $f$  - приведений коефіцієнт ттертя ковзання в підшипниках колес;

$k_p$  - коефіцієнт ддодаткового опору тертя реборд о головки рейок.

$D_k$  - діаметр колес, мм;

$d_{ц}$  - діаметр цапфи валу (оси) колеса, мм.

В мостових кранах з колесами без реборд і горизонтальними напрямними роликами опір руху від сил тертя визначається за формулою (2.27), вважаючи  $k_p=1,1$ .

Сила опору руху від от нахилу

$$F_y = (G_l + G_m) \sin \beta = (3136 + 3920) \sin 45^\circ = 4989 H$$

Тоді

$$F_c = F_{тр} + F_y = 24 + 4989 = 5013 H$$

Визначимо синхронну швидкість двигуна

$$V_c = \frac{V_H}{1 - s_H} = \frac{5}{1 - 0.5} = 10 \text{ м/с} \quad (2.1)$$

де  $s_H=0.5$  – номінальне ковзання.

Визначимо величину полюсного поділку ЛАД

$$\tau = \frac{V_c}{2 \cdot f_H} = \frac{10}{2 \cdot 50} = 0.1 \text{ м} \quad (2.2)$$

На основі досвіду проектування орієнтовно виберемо питому силу тяги  $F_{II}=0.5 \text{ Н/см}^2$ , на основі чого визначимо активну площу індуктора:

$$S_{акт} = \frac{F_{см}}{F_{II}} = \frac{5013}{0.5} = 10026 \text{ см}^2 \approx 1 \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

Орієнтовна ширина індуктора (приймаємо довжину реактивної полоси  $l_l$  рівною довжині вагонетки  $L$ )

$$b_1 = \frac{S_{акт}}{l_1} = \frac{1}{3} = 0.33 \text{ м} \quad (2.4)$$

За величиною  $\tau$  і  $b_1$  визначимо площу одного полюса

$$S_\tau = \tau \cdot b_1 = 0.1 \cdot 0.33 = 0.033 \text{ м}^2 \quad (2.5)$$

Попередньо знайдемо число полюсів індуктора

$$2p = \frac{S_{акт}}{S_\tau} = \frac{1}{0.033} \approx 30 \quad (2.6)$$

Число пазів індуктора на полюс і фазу та крок пазів

$$q_1 = \frac{\tau}{m \cdot t_1} = \frac{0.1}{3 \cdot 0.033} = 1 \quad (2.7)$$

$$t_1 = \frac{\tau}{k} = \frac{0.1}{3} = 0.033 \text{ м} \quad (2.8)$$

де  $k = 3, 6, 9, 12, 15, \dots$ ;

$m$  – число фаз.

Знайдемо розрахункове число пазів у магнітопроводі індуктора

$$Z_p = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 30 \cdot 3 \cdot 1 = 90 \quad (2.9)$$

Число пазів на полюс

$$Z_\tau = a \cdot q_1 = 3 \cdot 1 = 3 \quad (2.10)$$

При цьому загальне число пазів індуктора буде дорівнювати

$$Z_1 = Z_p + Z_\tau - 1 = 90 + 3 - 1 = 92$$

Критичне зусилля лінійного двигуна орієнтовно дорівнює

$$F_\kappa = \lambda \cdot F_{cm} = 1.5 \cdot 5012.592 = 7518.89 \text{ Н} \quad (2.11)$$

Розраховуємо механічну характеристику ЛАД за уточненою формулою Клосса, яка враховує крайові ефекти

$$F = 2F_k \cdot \left( \frac{1}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} - \frac{1}{2p \cdot \left( \frac{2-s}{s_k} + \frac{s_k}{2-s} \right)} \right) \quad (2.12)$$

де  $F_k$  – критичне зусилля розрахункової механічної характеристики;  $s$ ,  $s_k$  – ковзання і критичне ковзання відповідно;  $2p$  – число полюсів.

На основі досвіду проектування приймаємо критичне ковзання ЛАД приймаємо  $s_{1k} \approx 1$ .

Розрахуємо величину критичного зусилля розрахункової механічної характеристики

$$F_k = \frac{F_{cm}}{\left( \frac{1}{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n}} - \frac{1}{2p \cdot \left( \frac{2-s_n}{s_k} + \frac{s_k}{2-s_n} \right)} \right)} = \frac{5012.592}{\left( \frac{1}{\frac{0.5}{1} + \frac{1}{0.5}} - \frac{1}{30 \cdot \left( \frac{2-0.5}{1} + \frac{1}{2-0.5} \right)} \right)} \approx 13257.24 \text{ Н} \quad (2.13)$$

Перевантажувальна здатність двигуна

$$\lambda = \frac{F_k}{F_{н.см}} = \frac{13257.24}{5012.592} = 2.65 \quad (2.14)$$

Визначимо розрахункову потужність двигуна

$$P_{2мех} = \frac{F_{н.см} \cdot V_n}{10^3} = \frac{5012.592 \cdot 5}{10^3} = 25 \text{ кВт} \quad (2.15)$$

Розрахунковий струм двигуна

$$I_{1н} = \frac{P_{2мех}}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.6 \cdot 0.5} = 126.93 \text{ А} \quad (2.16)$$

Значення  $\cos \phi_n$ ,  $\eta_n$  попередньо прийняті на основі досвіду проектування.

Визначимо електромагнітну сталу часу ЛАД

$$T_{el} = \frac{1}{2\pi f_H S_k} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1} = 0.00318 \quad (2.17)$$

Жорсткість механічної характеристики

$$\beta = \frac{2 \cdot F_k}{s_k \cdot V_c} = \frac{2 \cdot 13257.24}{1 \cdot 10} = 1325.72 \quad (2.18)$$

Обмотка індуктора виконується двохшаровою із скороченим кроком. Визначимо число витків у фазі обмотки, виходячи із індукції у повітряному зазорі, яку попередньо приймаємо рівною  $B_\delta = 0.5$  Тл:

$$W_1 = \frac{E_1}{2\sqrt{2} \cdot f_1 \cdot k_w \cdot b_1 \cdot \tau_1 \cdot B_\delta} \quad (2.19)$$

де  $f_1$  – частота напруги живлення;

$k_w$  – обмоточний коефіцієнт;

$b_1$  – ширина індуктора;

$\tau_1$  – полюсний поділок;

$B_\delta$  – величина магнітної індукції в зазорі.

Значення  $E_1$  приймається рівним

$$E_1 = 0.8 U_\phi = 0.8 \cdot 220 = 176 \text{ В} \quad (2.20)$$

Визначимо обмоточні коефіцієнти:

$$K = K_y \cdot K_p \quad (2.21)$$

де  $K_y = \sin(\beta\pi/2)$  – коефіцієнт укорочення;

$\beta$  – відносний крок обмотки по пазах

$$\beta = \frac{m_1 \cdot q_1 - 1}{m_1 \cdot q_1} = \frac{3 \cdot 3 - 1}{3 \cdot 3} = 0.67 \quad (2.22)$$

$$K_y = \sin\left(\frac{0.67\pi}{2}\right) = 0.87 \quad (2.23)$$

Де коефіцієнт розподілення обмотки

$$K_p = \frac{\sin(\pi / 2m_1)}{q_1 \cdot \sin(\pi / 2m_1 \cdot q_1)} = \frac{\sin(\pi / 2 \cdot 3)}{q_1 \cdot \sin(\pi / 2 \cdot 3 \cdot 3)} = 1 \quad (2.24)$$

Підставивши (2.23), (2.24) в (2.21), отримуємо значення обмоточного коефіцієнта

$$K_w = K_p \cdot K_y = 1 \cdot 0.87 = 0.87 \quad (2.25)$$

Підставивши в (2.19) числові значення величин, отримуємо число витків у фазі обмотки

$$W_1 = \frac{176}{2\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0.87 \cdot 0.33 \cdot 0.1 \cdot 0.5} = 86 \quad (2.26)$$

Приймаємо  $w_1=86$  витків.

Число витків у пазу:

$$W_n = \frac{W_1}{p \cdot q_1} = \frac{86}{15 \cdot 1} = 5.73 \approx 6 \quad (2.27)$$

Визначимо переріз одного витка обмотки індуктора, приймаючи допустиму густину струму рівною  $\Delta_c = 4 \text{ А/мм}^2$ . Вибираємо провід круглого перерізу марки ПВБЛ з поперечним перерізом  $8 \text{ мм}^2$ . Один виток формуємо із 4 елементарних з вказаним перерізом. Тоді площа поперечного перерізу витка становитиме  $S=4 \cdot 8=32 \text{ мм}^2$ . Густина струму у витку буде рівна:

$$\Delta_c = \frac{I_{1H}}{4 \cdot S} = \frac{126.93}{4 \cdot 8} = 3,96 \text{ А / мм}^2 \quad (2.28)$$

Вибираємо висоту паза рівною  $h_n=60 \text{ мм}$  і ширину  $b_n=17 \text{ мм}$ . Коефіцієнт заповнення паза міддю приймаємо  $K_3=W_n \cdot S / (h_n \cdot b_n) = 6 \cdot 32 / (60 \cdot 17) = 0.2$

Тепер можна визначити розміри зубця:

$$b_z = t_1 - b_n = 3.33 - 1.7 = 1.63 \text{ см} \quad (2.29)$$

Знаючи ширину зубця, можна визначити точну довжину магнітопровода індуктора

$$l_c = Z_1 \cdot t_1 + b_z = 92 \cdot 33.33 + 16.3 = 3082.7 \text{ мм} \quad (2.30)$$

Лінійне навантаження двигуна

$$A = \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot I_1}{l_c} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 86 \cdot 126.93}{308.33} = 212.4 \text{ A/ см} \quad (2.31)$$

Тепер визначимо величину струму намагнічування і мінімальну висоту магнітопровода індуктора  $h_c'$ . Магнітний потік на полюс визначається за формулою:

$$\Phi_1 = \frac{2 \cdot b_1 \cdot \tau \cdot B_\delta}{\pi} = \frac{2 \cdot 0.33 \cdot 0.1 \cdot 0.5}{\pi} = 0.01 \text{ Вб} \quad (2.32)$$

При такому магнітному потоці і величині допустимої індукції в сталі ярма  $B_C = 1.4 \text{ Тл} = 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб/ см}^2$ , величина  $h_c'$  рівна:

$$h_c' = \frac{\Phi_1}{b_1 \cdot B_C} = \frac{0.01}{0.33 \cdot 1.4} = 0.023 \text{ м} \quad (2.33)$$

У зв'язку із застосуванням для набору і кріплення пакета індуктора натискних пластин, збільшуємо висоту ярма магнітопровода і приймаємо її рівною 4 см. Вибираємо величину ефективного немагнітного зазору  $\delta'$ . При цьому необхідно врахувати, що при немагнітному роторі товщина роторної пластини входить в величину повітряного зазору. Для лінійного двигуна доцільно вибирати величину зазору, рівну 0.04т.

$$\delta' = K_K \delta \quad (2.34)$$

де  $\delta$  – прийнятий повітряний зазор

$K_K$  – коефіцієнт повітряного зазору

$$K_K = \frac{t_1 + 10\delta}{b_z + 10\delta} = \frac{33.33 + 10 \cdot 4}{16.67 + 10 \cdot 4} = 1.29 \quad (2.35)$$

Тоді

$$\delta' = K_K \delta = 1.29 \cdot 4 = 5.18 \text{ мм} \quad (2.36)$$

Сила намагнічування повітряного зазору визначається за наступним виразом

$$2F_\delta = \frac{2\delta' \cdot B_\delta}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 5.18 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 41214 \text{ АВ} \quad (2.37)$$

Знаючи величину магнітної напруги зазору і нехтуючи рештою шляху магнітного потоку по сталі, визначимо величину струму намагнічування

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot 2F_{\delta}}{0.9m_1 \cdot W_1 \cdot K_w} = \frac{15 \cdot 4124}{0.9 \cdot 3 \cdot 86 \cdot 0.87} = 306 \text{ А} \quad (2.38)$$

За величиною ЕРС обмотки індуктора і струму намагнічування визначимо реактивний опір контуру намагнічування заступної схеми двигуна:

$$x_{\mu} = \frac{E_1}{I_{\mu}} = \frac{176}{306} = 0.575 \text{ Ом} \quad (2.39)$$

Визначимо активні і реактивні опори обмотки і реактивної полоси. Активний опір обмотки індуктора при 75 °С

$$r_1 = \rho_{75} \frac{l_{w_1} \cdot W_1}{S_1} = 0.0217 \frac{0.99 \cdot 86}{16} = 0.115 \text{ Ом} \quad (2.40)$$

де

$$l_{w_1} = 2b_1 + 3.6\tau \cdot \beta = 2 \cdot 0.33 + 3.6 \cdot 0.1 \cdot 0.89 = 0.99 \text{ м} \quad (2.41)$$

$\beta=0.89$  – відносний крок по пазах.

Реактивний опір розсіювання обмотки статора

$$X_1 = 4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{W_1^2}{p \cdot q_1} \cdot b_1 \cdot (\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\lambda 1} + \lambda_{\delta 1}) \quad (2.42)$$

де  $\lambda_{\pi 1}$  – пазова провідність розсіювання;  $\lambda_{\lambda 1}$  – провідність розсіювання лобових частин;  $\lambda_{\delta 1}$  – провідність диференційного розсіювання.

Для напівзакритого паза провідність розсіювання визначається із наступного виразу:

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{3\beta_1 + 1}{4} \cdot \left( \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} + \frac{h_0}{b_0} \right) \quad (2.43)$$

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{3 \cdot 0.89 + 1}{4} \cdot \left( \frac{56}{3 \cdot 17} + \frac{2}{17} + \frac{2}{14} \right) = 1.25 \quad (2.44)$$

Провідність розсіювання лобових частин обмотки

$$\lambda_{\lambda 1} = 0.57 \cdot \frac{\tau}{b_1} \cdot q_1 \cdot \frac{3\beta_1 - 1}{2} = 0.57 \cdot \frac{0.1}{0.33} \cdot 1 \cdot \frac{3 \cdot 0.89 - 1}{2} = 0.142 \quad (2.45)$$



Провідність диференційного розсіювання

$$\lambda_{\delta 1} = \frac{m_1 \cdot q_1}{\pi^2} \cdot \frac{\tau}{\delta'} \cdot K_w^2 \sigma_{\delta} = \frac{3 \cdot 3}{3.14^2} \cdot \frac{0.1}{0.0052} \cdot 0.87^2 \cdot 0.067 = 0.295 \quad (2.46)$$

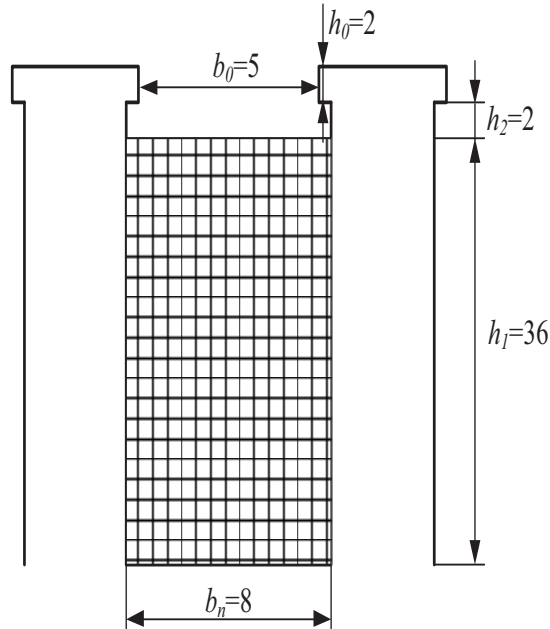


Рисунок 2.3 – Паз індуктора двигуна

Визначивши складові провідності розсіювання, знаходимо реактивний опір обмотки індуктора  $X_1$ :

$$X_1 = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{86^2}{15 \cdot 1} \cdot 0.33 \cdot (1.25 + 0.313 + 0.382) = 0.005 \text{ Ом} \quad (2.47)$$

Для визначення опору реактивної полоси, скористаємося заступною схемою, зображеною на рисунку 2.3. При цьому збільшення струму намагнічування у порівнянні із звичайним двигуном, будемо враховувати відповідним збільшенням коефіцієнта розсіювання  $\sigma_1$ .

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{\mu}} = 1 + \frac{0.005}{0.57} = 1.008 \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} r_1'' &= r_1 \cdot \sigma_1 & x_2'' &= x_2' \cdot \sigma_1^2 \\ x_1'' &= x_1 \cdot \sigma_1 & x_k &= x_1'' + x_2'' \end{aligned} \quad (2.49)$$

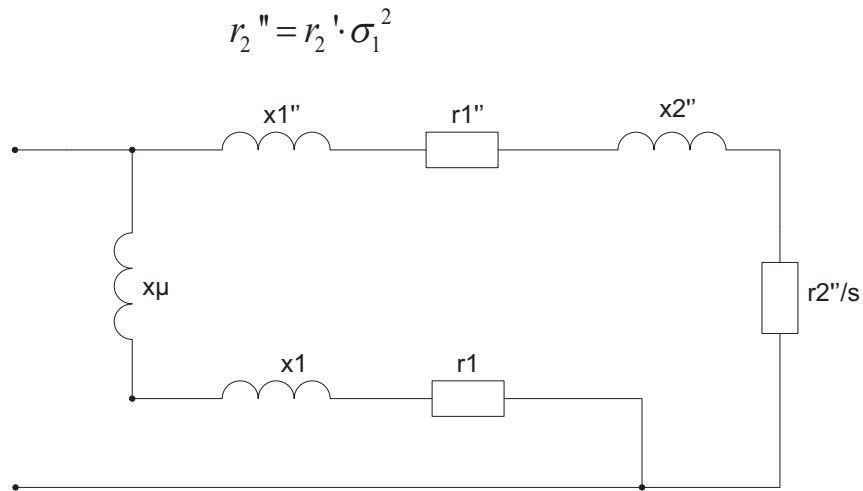


Рисунок 2.4 – Заступна схема двигуна, яка використовується для визначення опору реактивної полоси

Величину критичного зусилля визначимо за наступною формулою

$$F_k = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2V_c \cdot (r_1'' + \sqrt{r_1''^2 + x_k^2})} \quad (2.50)$$

Перетворюючи даний вираз, отримуємо значення  $X_k$

$$\begin{aligned} X_k &= \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2 - 2F_k \cdot V_c \cdot r_1''}{2F_k \cdot V_c}\right)^2 - r_1''^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2 - 2 \cdot 13257.24 \cdot 10 \cdot 0.12}{2 \cdot 13257.24 \cdot 10}\right)^2 - 0.12^2} = 0.41 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (2.51)$$

де

$$r_1'' = r_{1_{75}} \cdot \sigma_1 = 0.257 \cdot 1.05 = 0.12 \text{ Ом} \quad (2.52)$$

В свою чергу

$$X_K = X_1 \cdot \sigma_1 + X_2' \cdot \sigma_1^2 \quad (2.53)$$

На основі (2.53) маємо:

$$X_2' = \frac{X_K - \sigma_1 \cdot X_1}{\sigma_1^2} = \frac{0.41 - 1.04 \cdot 0.005}{1.008^2} = 0.374 \text{ Ом} \quad (2.54)$$

Визначимо вторинний опір полюси  $r_2'$  за формулою

$$r_2' = 4 \cdot m_1 \cdot W_1^2 \cdot K_w \cdot \frac{\rho \cdot b_1}{l_c \cdot \Delta} = 4 \cdot 3 \cdot 86^2 \cdot 0.87 \cdot \frac{0.0172 \cdot 0.33}{3083.33 \cdot 3.97} = 0.036 \text{ Ом} \quad (2.55)$$

На основі знайдених опорів визначимо фактичний струм двигуна. В номінальному режимі, тобто при номінальному ковзанні, струм визначається не опором  $r_2'$ , а величиною

$$R_2' = \frac{r_2'}{s_n} = \frac{0.036}{0.5} = 0.072 \text{ Ом} \quad (2.56)$$

Для визначення струму індуктора, тобто первинного струму двигуна, скористаємося Т-подібною заступною схемою, яка зображена на рисунку 2.4.

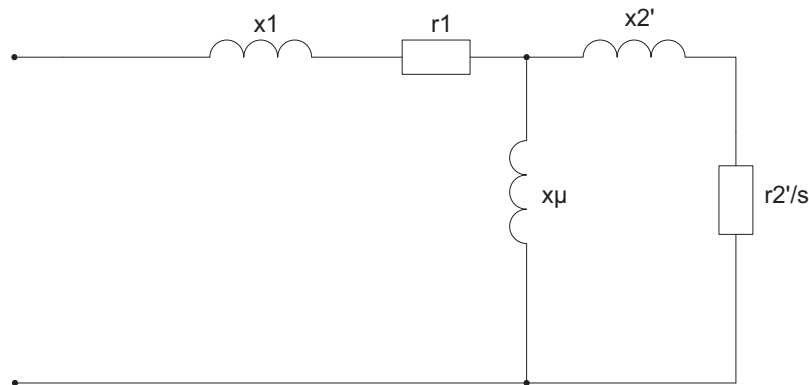


Рисунок 2.5 – Т-подібна заступна схема ЛАД

Повний приведений опір вторинного кола

$$Z_2' = R_2' + jX_2' = 0.072 + j0.374, \text{ Ом} \quad (2.57)$$

Розрахункові параметри ЛАД представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Параметри розрахованого лінійного двигуна

Номінальна потужність	25 кВт
-----------------------	--------

Номінальна лінійна напруга	380 В
Число пар полюсів	15
Коефіцієнт корисної дії	0.5
Коефіцієнт потужності	0.6
Перевантажувальна здатність	2.65
Номінальне ковзання	0.5
Критичне ковзання	1
Номінальна частота напруги статора	50 Гц
<b>Параметри Т-подібної схеми заміщення</b>	
Активний опір статора	0.115
Приведений активний опір ротора	36.12

### **Висновки до розділу 2**

1. Виконано розрахунок необхідного зусилля, яке повинен створювати двигун, а також його механічну і електричні параметри.
2. Розраховано конструктивні елементи ЛАД, що дає можливість здійснити його проектування.
3. Визначено електричні параметри схеми заміщення ЛАД, необхідні для проведення моделювання.
4. За розрахунками можна в подальшому обрати силове обладнання для керування двигуном.

## 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БАГАТОСЕКЦІЙНИМ ЛІНІЙНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ З ДОВГИМ ІНДУКТОРОМ

### 3.1 Вибір силового обладнання для лінійного електроприводу

В якості перетворювача частоти обрано DA1-34150FB-B55C фірми EATON [20] (рисунок 3.1). Параметри перетворювача приведені в таблиці 3.1.



Рисунок 3.1 – Перетворювач частоти DA1-34150FB-B55C

Таблиця 3.1 - Параметри перетворювача DA1-34150FB-B55C

Вид керування	скалярне (частотне)
Фазність	трифазний
Вхідна напруга, В	380-480
Потужність двигуна, кВт	75
Діапазон вихідної частоти, Гц	0..500
Номінальний струм, А	150
Дискретний вхід, В	до 30
Дискретний вихід, В	24

Аналоговий вхід, В, А	0 - 10, 0/4 - 20
Аналоговий вихід, В, А	0 - 10, 0/4 - 20
Степінь захисту корпусу	IP55
Робоча температура, °С	-40 .. +60
Висота, мм	865
Ширина, мм	330
Глибина, мм	330
Маса, кг	50

В якості автоматичного вимикача обрано NZMH3-AE250-AVE 110849 фірми АВВ [21]. Параметри перетворювача приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Параметри автоматичного вимикача

Серія	Tmax
Кількість полюсів	3Р
Робочий струм	250А
Тип напруги	АС
Вимикаюча здатність	150кА

Для захисту від перевищення швидкості вагонетки буде використано датчики швидкості ISD-3[22].



Рисунок 3.2 – Датчик швидкості ISD-3(ИСД-3)

Оптичний датчик ІСД-3 призначений для високоточного, безконтактного вимірювання швидкості і пройденого шляху транспортним засобом щодо дороги (в автомобільній промисловості) а також для вимірювання швидкості і довжини матеріалів, що рухаються щодо датчика (в промисловості).

Принцип вимірювання - растрова просторова фільтрація зображення об'єкта.

Основні особливості:

- Висока точність вимірювань - 0,03 - 0,1% в індустріальних застосуваннях і 0,1 - 0,2% в автомобільних;
- Широкий діапазон номінальних відстаней до об'єкта - від 10 см до 80 см і широкий діапазон допустимих змін відстані, яке може змінюватися при вимірах до 4-х разів;
- Велика світлосила оптики - до 1:4, оскільки немає необхідності діафрагмування приймальної оптики. Як наслідок, для освітлення об'єкта досить 10 Вт галогенною лампи і в багатьох випадках навіть 1,2 Вт ІЧ-діода;
- Широкий динамічний діапазон яскравості об'єкта - при вимірах він може змінюватися до 105 раз і різкі перепади яскравості не спотворюють вимірювань;
- Легкий, але міцний і герметичний корпус, клас захисту від навколишнього середовища - IP67.

Таблиця 3.2 - Параметри датчика швидкості

Параметр	Значення
Діапазон вимірюваних швидкостей	0,5 – 250 км/год
Точність вимірювання швидкості	$< \pm 0,2 \%$
Частота вимірювання	35,5 Гц
Напруга живлення	12 В
Питома потужність	18 Вт Модуль обробки 1,5 Вт



Діапазон робочих температур	-20 +40 ° C
Захист сенсора від оточуючої середи	IP67
Вихідні сигнали блока обробки: Аналоговий: Частотний: Цифровий:	Швидкість, 40мВ/м/с, до3 В  Шлях, 400Імп/м (=швидкість 400 Гц/м/с), ТТЛ сумісний, до 200 КГц  Передача всіх параметрів по мережі LAN
Фізична затримка оновлення вихідних сигналів	28 мс

### 3.2 Розробка схеми керування багатосекційним ЛАД

Лінійні електродвигуни з довгим індуктором знаходять використання в транспортних системах, підйомно-транспортних машинах і механізмах, металорізальних верстатах, системах запуску літаків на авіаносцях, артилерійських установках. Конструктивне виконання таких електродвигунів передбачає нерухоме встановлення активної частини (індуктора з обмоткою), вздовж якої по напрямним переміщується вторинний елемент (ротор), пов'язаний з виконуючим органом лінійного електроприводу. Вторинний елемент, як правило, має меншу довжину, чим індуктор і тому перекриває його лише частково. В результаті неповного перекриття індуктора вторинним елементом частина статора виявляється неробочою, тобто не взаємодіє з ротором і не створює корисного зусилля, але електричну енергію при цьому споживає. Величина цієї енергії навіть більша споживаної енергії робочої ділянки індуктора внаслідок розімкненості магнітопроводу останнього.

Для зменшення енергетичних втрат та збільшення гнучкості керування ЛД з довгим індуктором, обмотку статора доцільно виконати секціонованою з

паралельним підключенням секцій до мережі живлення. Довжина таких секцій повинна бути рівною, або більшою довжини ротора. Схема підключення обмотки індуктора секціонованого ЛД представлена на рисунку 3.3.

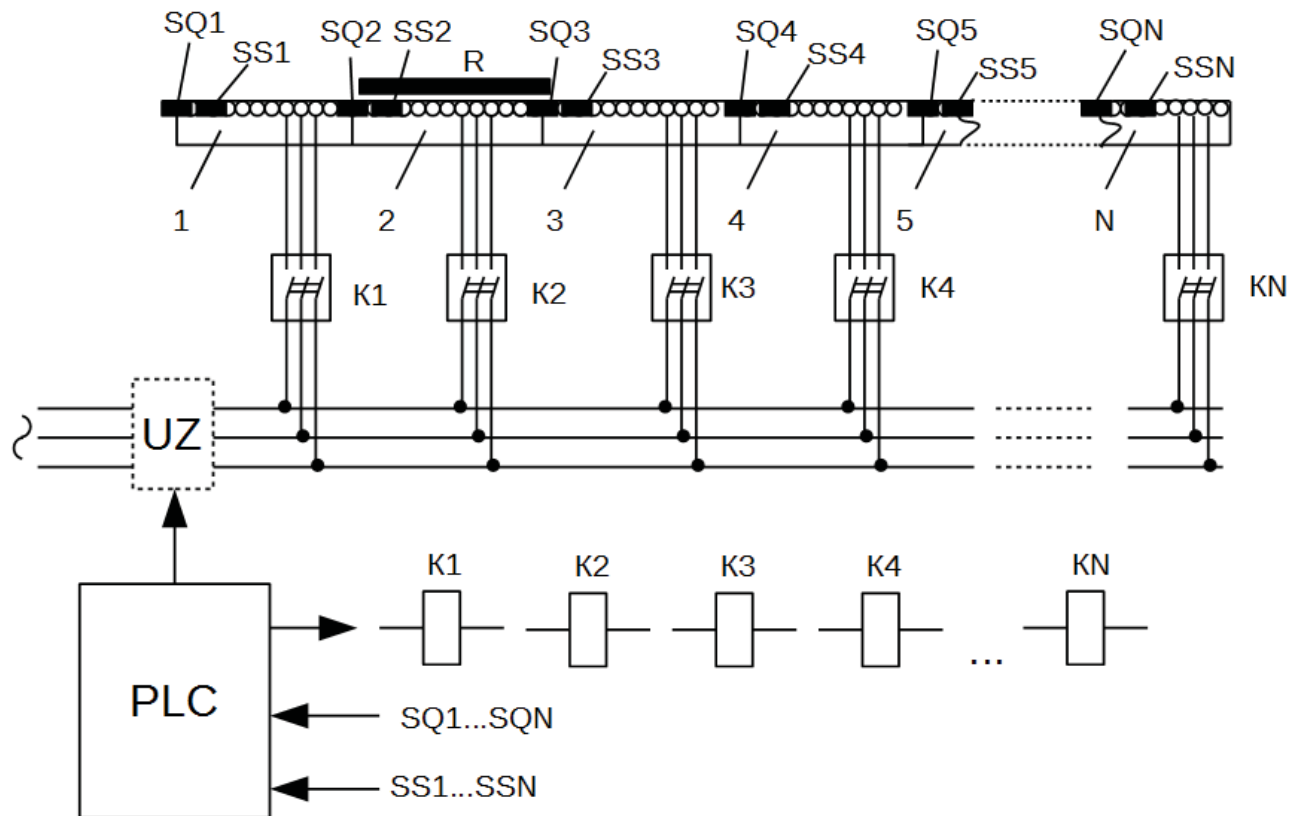


Рисунок 3.3 – Схема керування багатосекційним ЛД

На рисунку позначені: 1 ... N – секції індуктора; K1 ... KN – комутатори (контактні або безконтактні); R – ротор (вторинний елемент); S1 ... SN – датчики положення ротора; SS1 ... SSN – датчики швидкості UZ – перетворювач частоти (використовується при необхідності регулювання швидкості ЛАД); PLC - ПЛК.

Включення та відключення секцій індуктора відбувається безконтактними комутаторами, які керуються командами датчиків положення. При підході ротора до наступної секції індуктора спрацьовує датчик положення, розташований на початку секції і вмикає відповідний комутатор,

який подає живлення на дану секцію. Одночасно датчик відключає живлення попередньої секції індуктора.

За рахунок налаштування місця установки або часу спрацювання датчиків положення, комутація секцій ЛД може відбуватись синхронно або з відставанням по відношенню до ротора, що рухається. Останній режим може використовуватися для побічного регулювання прискорення та швидкості ЛД.

При необхідності здійснення режиму гальмування, окремі секції індуктора можуть підключатись комутаторами до джерела живлення із зворотним порядком чергування фаз. При цьому ротор ЛД буде переводитись в режим електричного гальмування.

ПЛК використовується для реалізації алгоритму керування і захистів. Сигнали від SS1 ... SSN потрапляють до ПЛК. ПЛК напряму керує комутаторами K1 ... KN.

Докладніша схема представлена на плакаті 2.

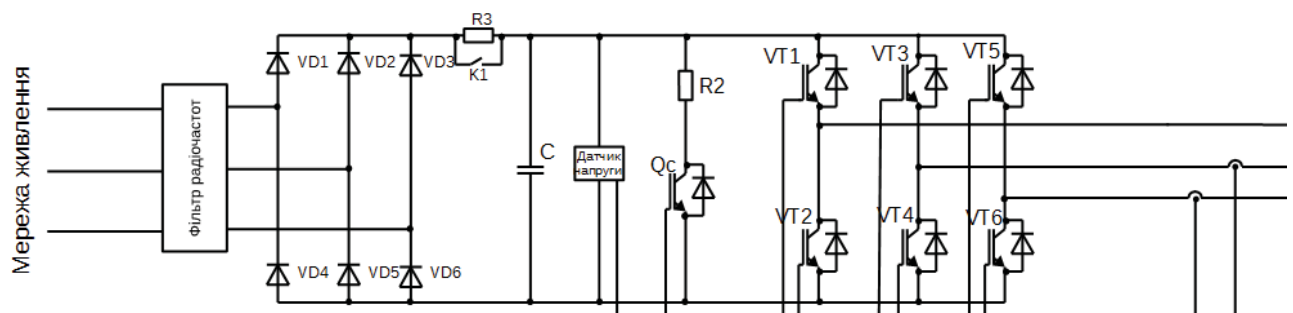


Рисунок 3.4 – Перетворювач частоти

Основні елементи перетворювача частоти представлені на рисунку 3.4.

Фільтр – складається з варисторів, які використовуються для захисту від перенапруг в ланці постійного струму, що виникають через сплески напруг мережі живлення, і з фільтру радіоперешкод, що перешкоджає поширенню в мережу високочастотних перешкод, що виникатимуть при комутації транзисторів інвертора.

Випрямляч – використовується для перетворення змінної напруги мережі в постійну напругу ланки постійного струму  $U_{dc}$ .

Ємнісний фільтр  $C$  – призначаться для згладжування випрямленої напруги, що утворюється на виході випрямляча.

Зарядне коло – складається з резистора  $R_z$  і ключа  $K_1$ , які забезпечують плавний заряд конденсатора  $C$  при подачі напруги живлення на перетворювач. Контакт реле  $K_{1.1}$  замикається при закінченні заряду.

Клампер – використовується в генераторних режимах роботи двигуна для рекуперації енергії в ланку постійного струму.

Датчик напруги – призначється для передачі в контролер даних по напрузі ланки постійного струму  $U_{dc}$ , де вони використовуються для контролю заряду ємності фільтру випрямляча, забезпечення захисних функцій і генерування імпульсів керування ключами інвертора по законам широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Інвертор – використовується для перетворення постійної напруги ланки постійного струму в трифазну задану напругу на виході перетворювача частоти. Результируючий вектор напруги (усереднений на періоді ШІМ) має задану частоту, модуль і кутове положення.

Датчики струму – призначаються для передачі в контролер даних про фазні струми двигуна, де вони використовуються для формування захисних функцій інвертора і двигуна.

### **Висновки до розділу 3**

1. Обрано перетворювач частоти DA1-34150FB-B55C, за допомогою якого буде відбуватися керування двигуном та автоматичний вимикач для захисту від струмів к. з. та перевантажень.
2. Складено схему багатосекційного ЛАД з довгим індуктором. Розроблено алгоритм комутації секцій ЛАД.

#### 4 СИНТЕЗ БЕЗКОНТАКТНОЇ СХЕМИ КЕРУВАННЯ БАГАТОСЕКЦІЙНИМ ЛАД

Алгоритм керування багатосекційним лінійним двигуном полягає в наступному: в початковому положенні вагонетка знаходиться на 1-ій секції індуктора ЛАД. При подачі оператором сигналу «start» вмикається перша секція ЛАД і вагонетка починає рух до другої секції. На початку другої секції розташовується кінцевий вимикач SQ2 і при його спрацюванні вмикається друга секція ЛАД, таким чином на цьому етапі працює 2 секції. При досягненні третьої секції спрацюває кінцевий вимикач SQ3 і вмикається третя секція, а перша вимикається. Таким чином відбувається вимкнення і вмикання секцій індуктора ЛАД до останньої, десятої секції, після якої починається в режимі вибігу вагонетки. Гальма вмикаються при аварійній ситуації в будь-якому положенні вагонетки, а ЛАД при цьому відключається. На рис. 4.1 зображено граф переходів станів на RS-тригерах.

Прийняті наступні позначення логічних змінних:

**start** – сигнал запуску вагонетки;

**stop** – сигнал запинки вагонетки;

**SQ1...SQ10** - кінцеві вимикачі секцій ЛАД;

**d1...d10** – сигнали ввімкнення ЛАД;

**galm** – сигнал спрацювання механічних гальм;

**avar** – сигнал аварії;

**overspeed** – сигнал перевищення дозволеної швидкості;

**current** – сигнал, що струм менший або більший дозволеного.

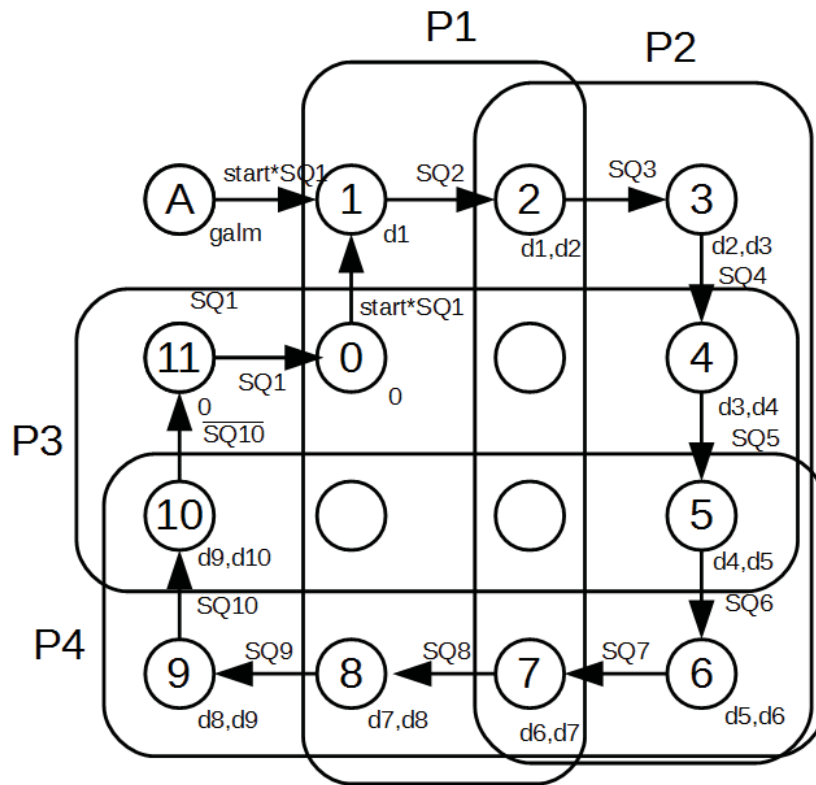


Рисунок 4.1 – Граф переходів

Складаємо логічні рівняння у відповідності до графу переходів рис. 4.1.

$$Sp1 = SQ1 \cdot \overline{p1} \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} + SQ7 \cdot p2 \cdot \overline{p3} \cdot p4 + start \cdot SQ1 \cdot \overline{p2} \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4}$$

$$Rp1 = SQ3 \cdot p2 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4} + SQ9 \cdot p2 \cdot p3 \cdot p4 + avar + stop$$

$$Sp2 = start \cdot p1 \cdot \overline{p3} \cdot p4$$

$$Rp2 = SQ8 \cdot p1 \cdot p3 \cdot \overline{p4} + avar + stop$$

$$Sp3 = SQ4 \cdot p1 \cdot p2 \cdot \overline{p4} + SQ10 \cdot p1 \cdot \overline{p2} \cdot p4$$

$$Rp3 = SQ6 \cdot \overline{p1} \cdot p2 \cdot p4 + SQ1 \cdot start \cdot p1 \cdot \overline{p2} \cdot \overline{p4} + avar + stop$$

$$Sp4 = SQ5 \cdot p1 \cdot \overline{p2} \cdot p3$$

$$Rp4 = SQ10 \cdot \overline{p1} \cdot p2 \cdot p3 + avar + stop$$

$$d1 = p1 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4}$$

$$d1 = p2 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4}$$

$$d3 = \overline{p1} \cdot p3 \cdot \overline{p4}$$

$$d4 = p1 \cdot p2 \cdot p3$$

$$d5 = \overline{p1} \cdot p2 \cdot p4$$

$$d5 = p1 \cdot p2 \cdot p4$$

$$d6 = p2 \cdot \overline{p3} \cdot p4$$

$$d7 = p1 \cdot \overline{p3} \cdot p4$$

$$d8 = p2 \cdot \overline{p3} \cdot p4$$

$$d9 = p1 \cdot \overline{p2} \cdot p4$$

$$d10 = p1 \cdot \overline{p2} \cdot p3 \cdot \overline{p4}$$

$$galm = p1 \cdot p2 \cdot \overline{p3} \cdot \overline{p4}$$

$$avar = overspeed + current$$

Программа в Codesys:

FUNCTION\_BLOCK Pusk

VAR\_INPUT

start: BOOL;

avar: BOOL;

SQ7: BOOL;

SQ3: BOOL;

SQ9: BOOL;

SQ2: BOOL;

SQ8: BOOL;

SQ4: BOOL;

SQ6: BOOL;

SQ1: BOOL;

SQ5: BOOL;

SQ10: BOOL;

overspeed: BOOL;

current: BOOL;

END\_VAR

VAR\_OUTPUT

galm: BOOL;

d1: BOOL;

d2: BOOL;

d3: BOOL;

d4: BOOL;

d5: BOOL;

d6: BOOL;

d7: BOOL;

d8: BOOL;

d9: BOOL;

d10: BOOL;



END\_VAR

VAR

RS1: RS;

p3: BOOL;

p4: BOOL;

p2: BOOL;

p1: BOOL;

RS2: RS;

RS3: RS;

RS4: RS;

END\_VAR

RS1(SET:= start AND SQ1 AND NOT p3 AND NOT p4 OR SQ7 AND p2 AND NOT p3 AND p4 OR SQ1 AND NOT p1 AND NOT p2 AND p3 AND NOT p4, RESET1:= SQ3 AND p2 AND NOT p3 AND NOT p4 OR SQ9 AND NOT p2 AND NOT p3 AND p4 OR avar, Q1=>p1);

RS2(SET:= SQ2 AND p1 AND NOT p3 AND NOT p4, RESET1:= SQ8 AND p1 AND NOT p3 AND p4 OR avar, Q1=>p2);

RS3(SET:= SQ4 AND NOT p1 AND p2 AND NOT p4 OR SQ10 AND NOT p1 AND NOT p2 AND p4, RESET1:= SQ6 AND NOT p1 AND p2 AND p4 OR SQ1 AND start AND p1 AND NOT p2 AND NOT p4 OR avar, Q1=>p3);

RS4(SET:= SQ5 AND NOT p1 AND p2 AND p3, RESET1:= NOT SQ10 AND NOT p1 AND NOT p2 AND p3 OR avar, Q1=>p4);

galm:= NOT p1 AND NOT p2 AND NOT p3 AND NOT p4;

d1:=p1 AND NOT p3 AND NOT p4;

d2:=p2 AND NOT p3 AND NOT p4;

d3:=NOT p1 AND p2 AND NOT p4;

d4:= NOT p1 AND p2 AND p3;

d5:= NOT p1 AND p2 AND p4;

d6:= p2 AND NOT p3 AND p4;

d7:= p1 AND NOT p3 AND p4;

$d8 := \text{NOT } p2 \text{ AND NOT } p3 \text{ AND } p4;$

$d9 := \text{NOT } p1 \text{ AND NOT } p2 \text{ AND } p4;$

$d10 := \text{NOT } p1 \text{ AND NOT } p2 \text{ AND } p3 \text{ AND } p4;$

$\text{Avar} := \text{overspeed OR current};$

Сама програма записується в окремий функціональний блок для зручності. З графу переходів на рис. 4.1 видно, що при початковому запуску програми спрацьовують гальма. Для переходу в режим руху повинен спрацювати датчик SQ1(сигнал SQ1=1) і надійти команда start від оператора. Тоді спрацьовує перший тригер і вмикається перша секція двигуна ( $d1=1$ ). Після того як передня частина вагонетки дістанеться початку другої секції, тобто спрацьовує кінцевий вимикач SQ2(сигнал SQ2=1) – спрацьовує другий тригер і перша секція ( $d1=1$ ) працює з другою ( $d2=1$ ), таким чином перша секція доштовхує вагонетку на другу секцію. При надходженні вагонетки на третю секцію скидається тригер 1 і активується третя секція  $d3(d3=1)$ , а перша вимикається ( $d1=0$ ). При надходженні вагонетки на четверту секція спрацьовує тригер 3 і активізується секція 4 ( $d4=1$ ), а друга вимикається ( $d2=0$ ). Аналогічно відбувається і для наступних секцій. Сигнал avar стає 1-цею якщо overspeed або current=1. Avar=1 – умова скидання всіх тригерів. Здійснюється перехід в стан А (аварія) і спрацьовують гальма.

Для вирішення поставленої задачі автоматизації застосуємо модульний програмований логічний контролер, що характеризується широким спектром можливих сфер застосування з вільно масштабованою структурою. Модульний ПЛК дає можливість гнучкого конструювання систем автоматизації в точній відповідності з необхідними вимогами.

Виходячи з техніко-економічних вимог вибираємо модульний ПЛК виробництва фірми Eaton XC-CPU101-FC128K-8DI-6DO.

Для забезпечення необхідної кількості входів і виходів вибираємо модуль розширення входів/виходів:

XIOC-8DI – 8 цифрових входів (24 В);

XIOC-8DO – 8 цифрових виходів (24 В).

Обраний контролер має роз'єм RS232 для підключення програматора і роз'єм підключення для децентралізованої мережі CANopen, 8 цифрових входів (24 В) та 6 цифрових виходів (24 В). Умовно модуль поділено на 2 функціональних частини:

1. Процесорний модуль;
2. Модуль живлення (24 В) з вбудованими цифровими входами та виходами.



Рисунок 4.2 – Модульний ПЛК XC-CPU101-FC128K-8DI-6DO

Особливість підключення даного контролера до джерела живлення 24 В полягає в роздільному підключенні процесорного блоку та блоку входів/виходів.

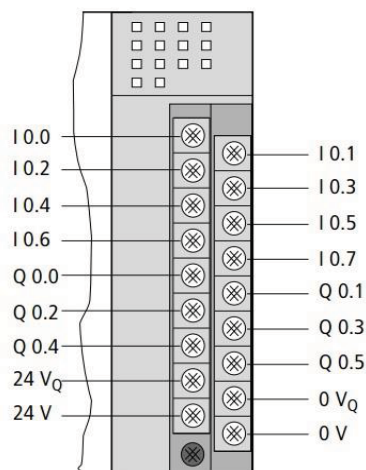


Рисунок 4.3 – Підключення блоку живлення та вбудованих входів/виходів

Розпіновка даного блоку є наступною:

1. I0.0 to I0.7: local digital inputs
2. Q0.0 to Q0.5: local digital outputs
3. 0VQ/+24VQ: supply voltage for the local inputs/outputs
4. 0V/+24V: supply voltage to the processor unit

Даний ПЛК має об'єм внутрішньої пам'яті 128 КБайт.

Для забезпечення необхідної кількості входів і виходів вибираємо 2 модулі розширення входів/виходів: XIOC-8DI – 8( цифрові входи) і XIOC-8DO – 8( цифрові виходи). Також для аналогових сигналів використано XIAI-12. Виходи контролера:  $I_Q=0,5$  А, напруга  $U=24$  В, кількість задіяних виходів  $n=6$

$$I_{\Sigma Q} = n \cdot I_Q = 6 \cdot 0,5 = 3 \text{ А}$$

$$P_Q = I_{\Sigma Q} \cdot U = 3 \cdot 24 = 72 \text{ Вт}$$

Входи контролера:  $I_I=3,5$  мА, напруга  $U=24$  В. кількість задіяних входів  $n=8$

$$I_{\Sigma I} = n \cdot I_I = 8 \cdot 3,5 = 28 \text{ мА}$$

$$P_I = I_{\Sigma I} \cdot U = 28 \cdot 24 = 0,672 \text{ Вт}$$

Потужність, яка споживається модулем розширення входів XIOC-8DI:

$I_Q=3,5$  мА, напруга  $U=24$  В. кількість задіяних входів  $n=6$

$$P_{A3} = I_Q \cdot n \cdot U = 3,5 \cdot 6 \cdot 24 = 0,504 \text{ Вт}$$

Потужність, яка споживається модулем розширення виходів XIOC-8DO:

$I_Q=0,5$  мА, напруга  $U=24$  В. кількість задіяних виходів  $n=5$

$$P_{A2} = I_Q \cdot n \cdot U = 0,5 \cdot 5 \cdot 24 = 0,06 \text{ Вт}$$

Потужність, яка споживається модулем розширення входів XIAI-12

$I_Q=0,5$  мА, напруга  $U=24$  В. кількість задіяних виходів  $n=6$

$$P_{A2} = I_Q \cdot n \cdot U = 0,5 \cdot 6 \cdot 24 = 0,06 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{вл}} = 6 \text{ Вт}$$

Необхідна сумарна потужність ПЛК:

$$P_{\Sigma \text{ПЛК}} = P_{\text{вл}} + P_Q + P_I + P_{A3} + P_{A2} = 6 + 72 + 0,672 + 0,504 + 0,06 + 0,072 \cdot 2 = 78,895 \text{ Вт.}$$

Для живлення процесорного модулю та цифрових входів/виходів вибираємо джерело постійної напруги 24 В EASY600-POW з номінальним струмом навантаження 4,2 А, та номінальною вхідною напругою 220 В, 50 Гц.

Модуль живлення підключений через автоматичний вимикач Z-MS-0,4/3 з номінальним струмом 0,4 А.

$$I_{FU1}=3 \cdot 1,2=3,6 \text{ (A)};$$

$$I_{FU2}=3 \cdot 1,2=3,6 \text{ (A)};$$

$$I_{FU3}=0,021 \cdot 1,2=0,0252 \text{ (A)};$$

$$I_{FU4}=0,025 \cdot 1,2=0,03 \text{ (A)};$$

$$I_{FU5}=0,036 \cdot 1,2=0,0432 \text{ (A)};$$

$$I_{FU6}=0,036 \cdot 1,2=0,0432 \text{ (A)};$$

Таблиця 4.1 - Таблиця внутрішніх з'єднань

№ п/п	Назва сигналу на схемі	Призначення сигналу	Схема з'єднань внутрішніх	
			Контакти	Номер провідни ка
1	SQ1	Кінцевий вимикач 1-ої секції ЛАД	-XT1:1 =A2-X6:I1.0	1
2	SQ2	Кінцевий вимикач 2-ої секції ЛАД	-XT1:2 =A2-X6: I1.1	2
3	SQ3	Кінцевий вимикач 3-ої секції ЛАД	-XT1:3 =A2-X6: I1.2	3
4	SQ4	Кінцевий вимикач 4-ої секції ЛАД	-XT1:4 =A2-X6: I1.3	4
5	SQ5	Кінцевий вимикач 5-ої секції ЛАД	-XT1:5 =A2-X6: I1.4	5
6	SQ6	Кінцевий вимикач 6-ої секції ЛАД	-XT1:6 =A2-X6: I1.5	6
7	SQ7	Кінцевий вимикач 7-ої секції ЛАД	-XT1:7 =A1-X5: I0.0	7
8	SQ8	Кінцевий вимикач 8-ої секції ЛАД	-XT1:8 =A1-X5: I0.1	8
9	SQ9	Кінцевий вимикач 9-ої секції ЛАД	-XT1:9 =A1-X5: I0.2	9
10	SQ10	Кінцевий вимикач 10-ої секції ЛАД	-XT1:10 =A1-X5: I0.3	10
11	Start	Кнопка запуску вагонетки	-XT1:11 =A1-X5: I0.4	11
12	Stop	Кнопка запинки	-XT1:12 =A1-X5: I0.5	12
13	D1	Сигнал ввімкнення секції 1	-XT2:1	15

			=A1-X5: Q0.0	
14	D2	Сигнал ввімкнення секції 2	-XT2:2 =A1-X5: Q0.1	16
15	D3	Сигнал ввімкнення секції 3	-XT2:3 =A1-X5: Q0.2	17
16	D4	Сигнал ввімкнення секції 4	-XT2:4 =A1-X5: Q0.3	18
17	D5	Сигнал ввімкнення секції 5	-XT2:5 =A1-X5: Q0.4	19
18	D6	Сигнал ввімкнення секції 6	-XT2:6 =A1-X5: Q0.5	20
19	D7	Сигнал ввімкнення секції 7	-XT2:7 =A3-X7: Q1.0	21
20	D8	Сигнал ввімкнення секції 8	-XT2:8 =A3-X7: Q1.1	22
21	D9	Сигнал ввімкнення секції 9	-XT2:9 =A3-X7: Q1.2	23
22	D10	Сигнал ввімкнення секції 10	-XT2:10 =A3-X7: Q1.3	24
23	Brakes	Кнопка в кабіні поверх 3	-XT2:11 =A3-X7: Q1.4	25
24	SS1	Сигнал від датчику швидкості SS1	-XT4:1 =A4-X8: I2.0	28
25	SS2	Сигнал від датчику швидкості SS2	-XT4:2 =A4-X8: I2.1	29
26	SS3	Сигнал від датчику швидкості SS3	-XT4:3 =A4-X8: I2.2	30
27	SS3	Сигнал від датчику швидкості SS4	-XT4:4 =A4-X8: I2.3	31
28	SS5	Сигнал від датчику швидкості SS5	-XT4:5 =A4-X8: I2.4	32
29	SS6	Сигнал від датчику швидкості SS6	-XT4:6 =A4-X8: I2.5	33
30	SS7	Сигнал від датчику швидкості SS7	-XT4:7 =A5-X9: I3.0	34
31	SS8	Сигнал від датчику швидкості SS8	-XT4:8 =A5-X9: I3.1	35
32	SS9	Сигнал від датчику швидкості SS9	-XT4:9 =A5-X9: I3.2	36
33	SS10	Сигнал від датчику швидкості SS10	-XT4:10 =A5-X9: I3.3	37
34	Current1	Сигнал від датчику швидкості SS12	-XT4:11 =A5-X9: I3.4	38

35	Current2	Сигнал від датчику швидкості SS1	-ХТ4:12 =А5-Х9: І3.5	39
----	----------	----------------------------------	-------------------------	----

Електрична принципова схема лінійного електроприводу та системи автоматизації представлені на плакатах 3 і 6, відповідно.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Переваги лінійного електроприводу з безконтактною схемою керування багатосекційним ЛД з довгим індуктором:

- простота конструкції;
- можливість отримання тягового зусилля безпосередньо, без механічного контакту між первинною і вторинною частинами ЛД;
- відсутність струмопідводу до ротора;
- економія електроенергії за рахунок подачі живлення лише на активну секцію індуктора під час руху ротора; інші секції індуктора при цьому залишаються відключеними;
- можливість побічного регулювання прискорення та швидкості в процесі руху ротора за рахунок затримки комутації секцій індуктора без регулювання параметрів мережі живлення

2. Недоліки лінійного електроприводу з довгим індуктором:

- значні капітальні вкладення у зв'язку з великою довжиною активного індуктора;
- необхідність забезпечення постійної величини робочого повітряного зазору між індуктором та вторинним елементом по всій довжині ЛД;
- знижені значення ККД і коефіцієнта потужності внаслідок відносно великої величини робочого зазору та кінцевих ефектів, викликаних розімкненістю магнітопроводу індукторів;
- складність розрахунку та математичного моделювання ЛД у зв'язку з необхідністю врахування неповного перекриття індуктора вторинним елементом в процесі руху.



## 5 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ЛАД

Як вже вказувалося, особливостями лінійних асинхронних двигунів є велика, у порівнянні з обертовими двигунами, величина робочого повітряного зазору, а також розімкненість магнітопроводу.

Велика величина зазорів ЛАД викликає необхідність підвищення індукції у первинній частині двигуна (індукторі). По цій же причині величина індукції у вторинному елементі виявляється зниженою.

Розімкненість магнітопроводу ЛАД приводить до виникнення так званих кінцевих ефектів, що спотворюють розподіл магнітного поля по довжині індуктора. Останнє викликає асиметрію струмів у фазах обмотки індуктора, що погіршує ККД і  $\cos\phi$  двигуна.

В цьому підрозділі виконано математичне моделювання ЛАД з урахуванням вказаних особливостей. В основу моделі покладена Т-подібна схема заміщення ЛАД (див. рис. 5.1), яку отримано шляхом синтезу схем, що враховують поперечний і поздовжній крайовий та кінцевий ефекти, а також конструктивне виконання ЛАД з довгим і коротким вторинним елементом.

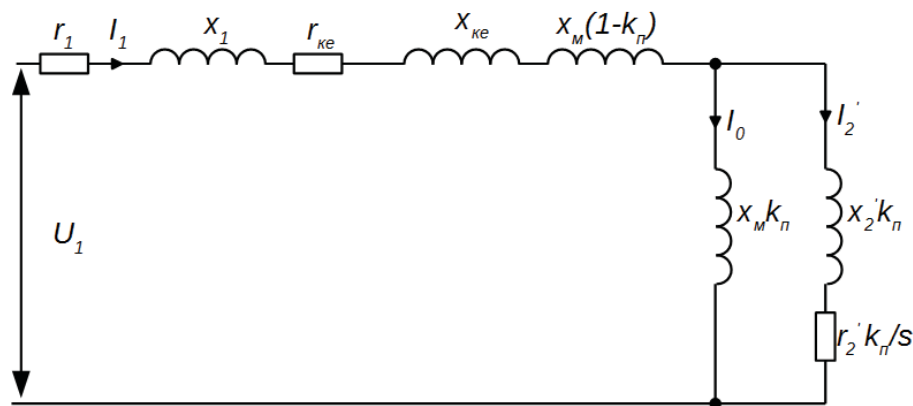


Рисунок 5.1 – Т-подібна схема заміщення ЛАД з неповним перекриттям

Передбачається, що обмотки індуктора симетричні і створюють у зазорі гармонійну хвилю магніторушійної сили, а складові електромагнітних полів, обумовлені крайовими ефектами, не взаємодіють. На заступній схемі позначені:  $r_1$  - активний опір обмотки індуктора,  $x_1$  - реактивний опір

розсіювання обмотки індуктора;  $r_{к.е}$ ,  $x_{к.е}$  - дійсна і мніма частини комплексного опору, що враховує вплив поздовжнього крайового ефекту;  $x_m$  - реактивний опір взаємоіндукції;  $x_2'$  - вторинний приведений реактивний опір;  $r_2'$  - активний опір вторинного елемента, що розраховується з урахуванням поперечного крайового ефекту;  $U_1$  - первинна фазна напруга;  $I_1$  - струм обмотки індуктора;  $I_1$  - струм намагнічування;  $I_2'$  - приведений струм вторинного елемента;  $s$  - ковзання;  $k_{\Pi}$  - коефіцієнт, що враховує перекриття індуктора вторинним елементом (див. рис. 5.2). Як видно з рисунка, для ЛАД з довгим вторинним елементом (рис. 5.2, а)  $k_{\Pi} = 1$ , а для випадків короткого вторинного елемента величина  $k_{\Pi}$  визначається співвідношенням довжини індуктора  $l_i$  і довжини вторинного елемента  $l_{ве}$ , а також їхнім взаємним перекриттям  $l_x$ . Відповідно, для варіанту конструктивного виконання на рис. 5.2, б  $k_{\Pi} = (l_i - l_x)/l_i$ , для варіанту рис. 5.2, в  $k_{\Pi} = l_{ве}/l_i$ .

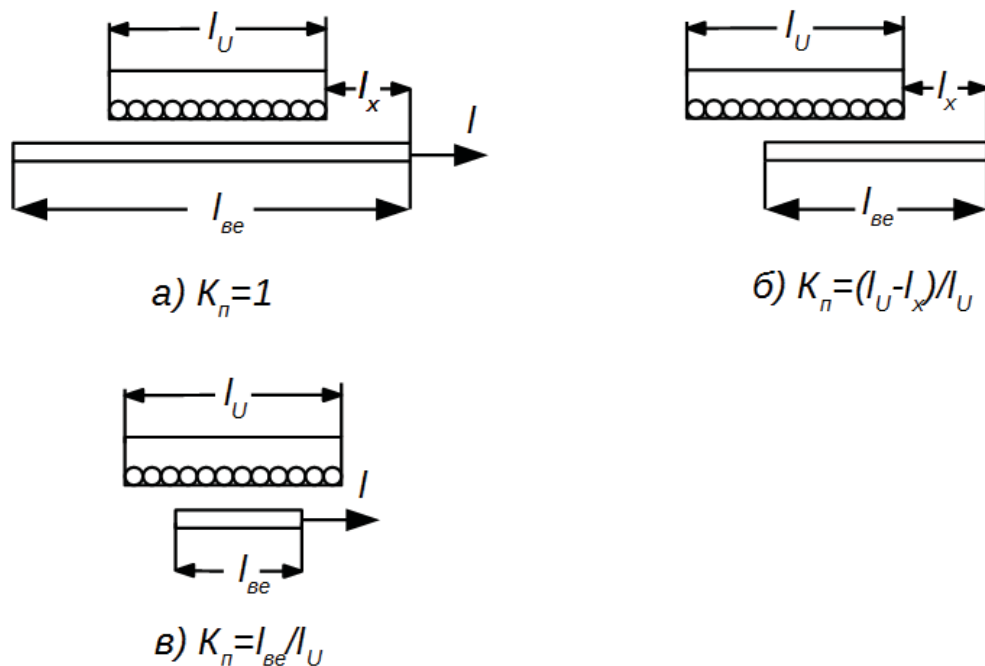


Рисунок 5.2 - Модифікації ЛАД з довгим та коротким індуктором

Оскільки найбільш прийнятним для асинхронного електропривода є частотне регулювання швидкості ЛАД, введемо відносні величини частоти статора  $\alpha = f_1/f_{1н}$  і ротора  $\beta = f_2/f_{1н}$ , де  $f_1$  - частота первинної фазної напруги,

відмінна від номінальної,  $f_2$  - частота струму вторинного елемента,  $f_{1n}$  - номінальна частота. Тоді абсолютне ковзання ЛАД при частоті, відмінній від номінальної, може бути визначене наступним чином:

$$s = \frac{\alpha}{\beta}. \quad (5.1)$$

Струм обмотки індуктора ЛАД визначається виразом:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_\Sigma}, \quad (5.2)$$

де  $Z_\Sigma = \sqrt{A/B}$  - повний еквівалентний опір фази обмотки індуктора.

Багаточлени  $A$  і  $B$  для Т-подібної схеми заміщення дорівнюють, відповідно [2]:

$$A = (a^2 + b^2 \alpha^2) \beta^2 + 2r_{1\Sigma} r_2' \alpha \beta + (c^2 + d^2 \alpha^2) r_2'^2,$$

$$B = \frac{r_2'}{x_M k_\Pi} + \left(1 + \frac{x_2'}{x_M}\right)^2 \beta^2,$$

$$\text{де } a = r_{1\Sigma} \left(1 + \frac{x_2'}{x_M}\right), \quad b = x_{1\Sigma} + x_2' k_\Pi + x_{1\Sigma} \frac{x_2'}{x_M}, \quad c = \frac{r_{1\Sigma}}{x_M k_\Pi},$$

$$d = 1 + \frac{x_{1\Sigma}}{x_M k_\Pi}, \quad r_{1\Sigma} = r_1 + r_{\text{ке}}, \quad x_{1\Sigma} = x_1 + x_{\text{ке}} + x_M (1 - k_\Pi).$$

Сила тяги ЛАД, визначена через напругу індуктора, дорівнює:

$$F = \frac{m_1 U_1^2 r_2' \beta}{2\tau I_{1n} A}, \quad (5.3)$$

де  $m_1$  - число фаз обмотки індуктора,  $\tau$  - полюсне ділення.

Індуктивний опір розсіювання вторинного ланцюга, виражений через реактивний опір взаємоіндукції і враховуючий вплив вторинного ланцюга

двигуна на первинний внаслідок дії вторинних струмів, що розмагнічують, а також наявність поперечного крайового ефекту, дорівнює:

$$x_2' = (1 - \frac{k_p}{k^2}) x_M. \quad (5.4)$$

Приведений активний вторинний опір ЛАД з урахуванням поперечного крайового ефекту, визначається залежністю:

$$\frac{r_2'}{s} = \frac{k_a x_M}{k^2}. \quad (5.5)$$

У формулах (5.4), (5.5)  $k_2$ ,  $k_p$  і  $k = \sqrt{k_a^2 + k_p^2}$  - коефіцієнти, що є функціями параметрів машини - ширини індуктора, величини полюсного ділення, магнітного числа Рейнольдса і залежні тільки від одного змінної – ковзання.

Опори  $r_{к.е}$ ,  $x_{к.е}$ , які враховують вплив поздовжнього кінцевого ефекту, є, відповідно, дійсною і мнимою частинами комплексного опору  $Z_{к.е}$ :

$$Z_{к.е} = -\frac{Z_{емо}}{4\pi p} \left[ \frac{\lambda + \eta + j}{\lambda(\lambda - \eta - j)} (1 - e^{-(\lambda - \eta)2p\pi}) + \frac{\lambda - \eta - j}{\lambda(\lambda + \eta + j)} (1 - e^{-(\lambda + \eta)2p\pi}) \right],$$

$$\text{де } \eta = (1-s)\frac{\varepsilon_0}{2}, \quad \lambda = \sqrt{\eta^2 + j\varepsilon_0}, \quad Z_{емо} = x_M \frac{j}{1 + j\varepsilon_0 s}, \quad \varepsilon_0 - \text{магнітне число Рейнольдса}$$

при ковзанні  $s=1$ .

Оскільки всі елементи заступної схеми ЛАД визначені, а також наявні залежності, що дозволяють визначити основні змінні двигуна -  $I_L$ ,  $F$ ,  $s$ , можна скласти структурну схему лінійного електропривода, на якій заступна схема ЛАД буде представлена функціональними блоками  $Z_A$  і  $Z_B$ , вихідними величинами яких є, відповідно, багаточлени  $A$  и  $B$ , обумовлені, параметрами і змінними машини.

При розробці і дослідженні електропривода з ЛАД в ряді випадків необхідно також враховувати насичення його магнітопроводу. Приймаючи до

уваги розглянуті на початку цього підрозділу особливості ЛАД, будемо вважати нелінійно залежним від струму індуктора, внаслідок насичення, лише реактивний опір розсіювання обмотки. Отримана структурна схема, завдяки наявності у ній струму індуктора в якості однієї з змінних, дозволяє ввести зазначену нелінійність, як це показано на рис. 5.3.

На рис. 5.3 представлена структурна схема частотно-регульованого ЛАД, що враховує поперечний і поздовжній крайові ефекти, неповне перекриття індуктора вторинним елементом, насичення магнітопроводу. Переривчастою лінією на схемі показані ланки, що відносяться до механічної частини двигуна і відповідають рівнянню динаміки для поступального руху:

$$F - F_0 = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2 l}{dt^2}, \quad (5.6)$$

де  $F_0$  - сила опору руху,  $m$  - маса рухомої частини ЛАД,  $v$  - лінійна швидкість,  $l$  - шлях.

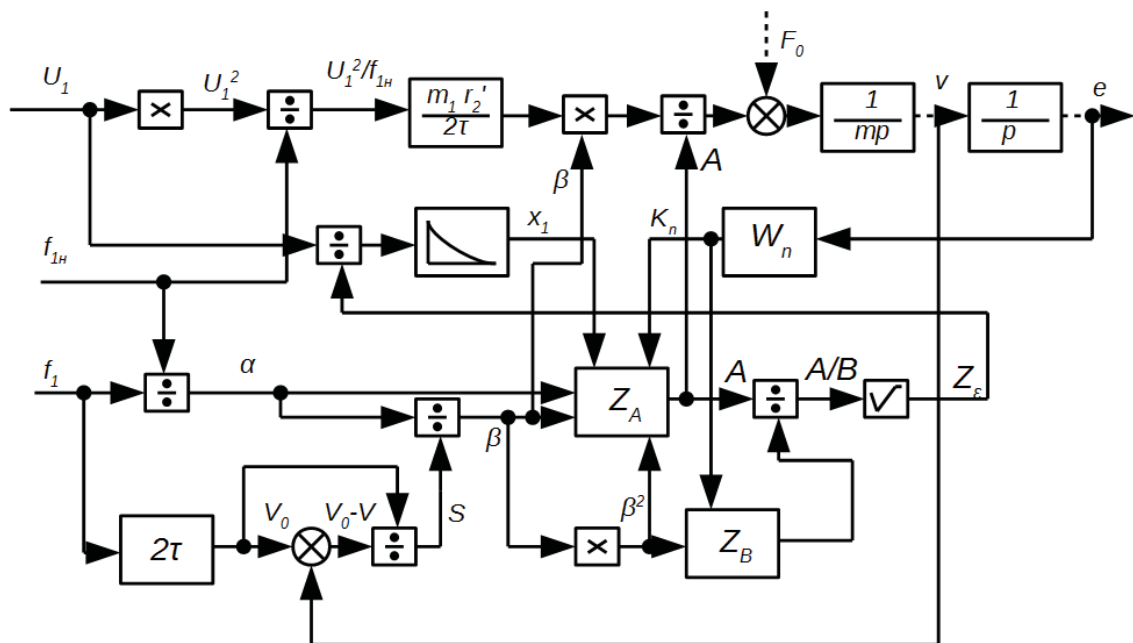


Рисунок 5.3 – Структурна схема лінійного електроприводу

## Висновки до розділу 5

1. В даному підрозділі було виконано математичне моделювання ЛАД із врахуванням кінцевих ефектів, які викликають асиметрію струмів, що в свою чергу викликає погіршення к. к. д. і  $\cos\phi$  двигуна. Крім того дана математична модель враховує коефіцієнт перекриття реактивною половою індуктора. За основу моделі прийнята Т-подібна схема заміщення ЛАД, яку отримано шляхом синтезу схем, що враховують поперечний і поздовжний крайовий та кінцевий ефекти, а також конструктивне виконання ЛАД з довгим і коротким вторинним елементом.
2. Розімкненість магнітопроводу ЛАД приводить до виникнення так званих кінцевих ефектів, що погіршують розподіл магнітного поля по довжині індуктора. Це, в свою чергу, викликає асиметрію струмів у фазах обмотки індуктора, що погіршує к. к. д. і  $\cos\phi$  двигуна.
3. Велика величина зазорів ЛАД викликає необхідність підвищення індукції у первинній частині двигуна (індукторі). З цієї ж причини величина індукції у вторинному елементі виявляється зниженою.

## 6 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Для оцінки впливу особливостей ЛАД з довгим індуктором на статичні і динамічні характеристики електроприводу проведено і проаналізовано порівняльне моделювання перехідних процесів пуску і накиду навантаження лінійного асинхронного двигуна з і без врахування коефіцієнту перекриття. Результати моделювання представлені на рис. 6.1. Числові значення параметрів ЛАД наступні: довжина індуктора 6 м, довжина вторинного елемента 3 м, число пар полюсів 15, маса рухомої частини 720 кг,  $r_1=0.115$  Ом,  $r_2'=0.072$ ,  $L_1=0.01$  Гн,  $L_2'=0.002$  Гн,  $L_M=0.002$  Гн).

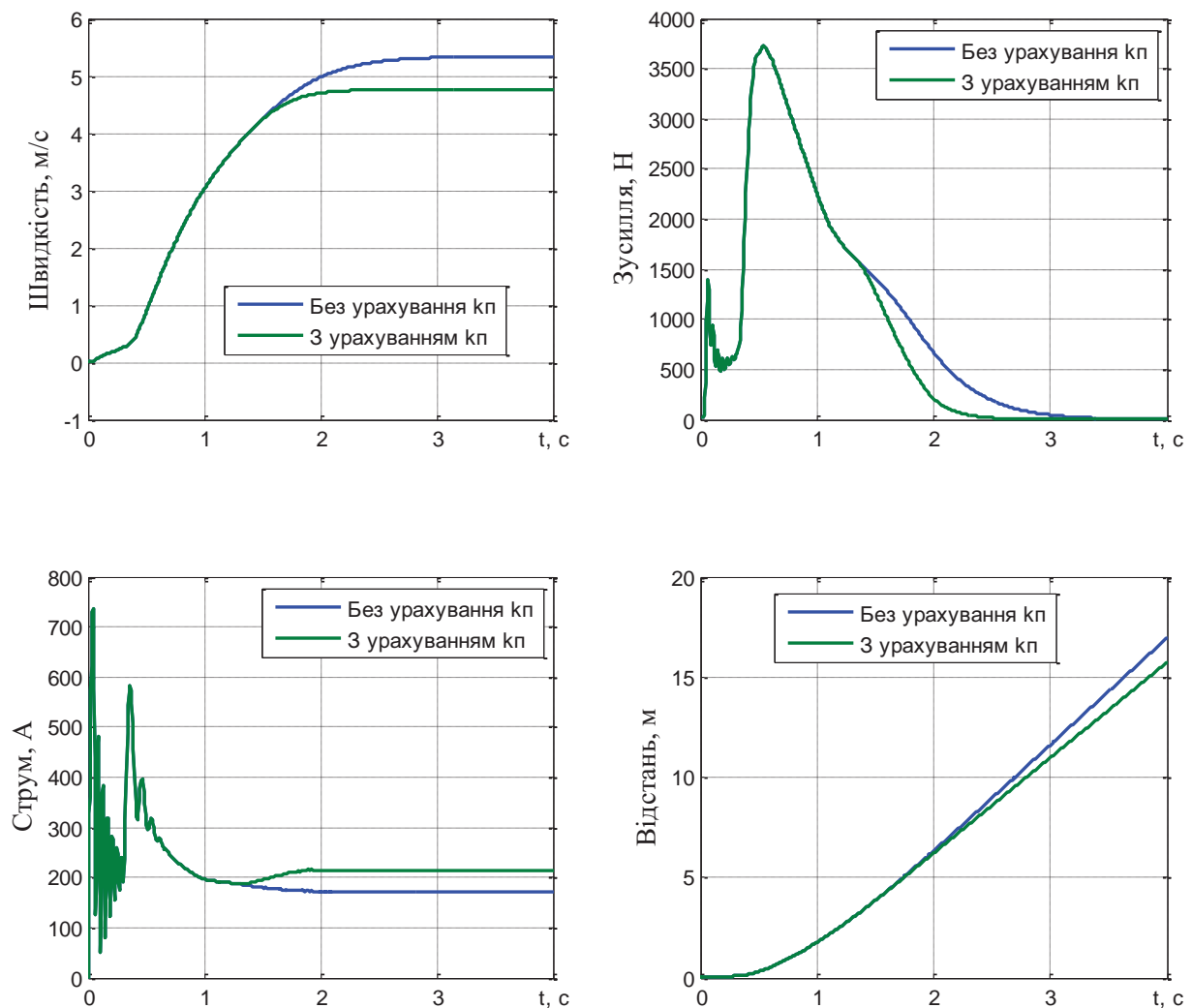


Рисунок 6.1– Лінійна швидкість, зусилля, струм ЛАД і відстань пройдена вагонеткою з і без врахування коефіцієнту перекриття

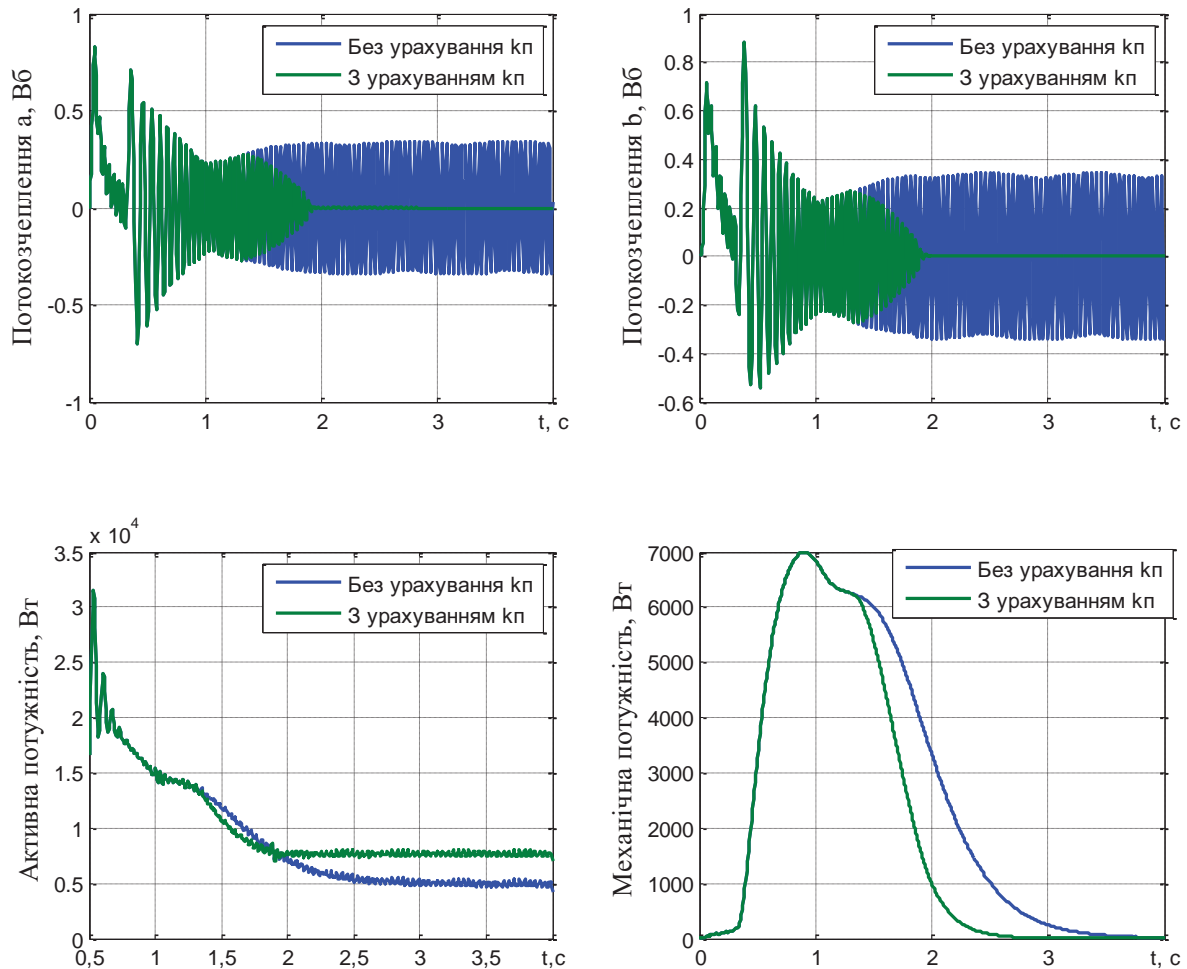


Рисунок 6.2 – Потокозчеплення, активна і механічна потужність ЛАД з і без врахування коефіцієнту перекриття

Розгін відбувається в 2 ступені, спочатку плавно, для того щоб уникнути небажаного дискомфорту пасажирів, а потім з 0,3 с прискорення збільшується і швидкість пошинає наростати інтенсивніше. Максимальне прискорення при пуску складає  $5,2 \text{ м/с}^2$ . Зусилля і механічна потужність досягає максимуму в 3727 Н і 6993 Вт відповідно в 0,9 с, причому для обох варіантах, як для варіанту з врахуванням коефіцієнту перекриття, так і без його врахування. Коли вторинний елемент проходить 3 м в 1,3 с, коефіцієнт перекриття починає зменшуватись, тому зменшується зусилля, відповідно зменшується прискорення. В 2,5 с вторинний елемент проходить 6 метрів і коефіцієнт



перекриття дорівнює 0-лю. Тому зусилля і механічна потужність в двигуна з врахуванням коефіцієнту перекриття дорівнюють 0-лю. Вагонетка не досягла усталеної швидкості в 5,3 м/с, а вийшла на швидкість 4,75 м/с. Струм в усталеному режимі без коефіцієнту перекриття складає 172 А, з коефіцієнтом перекриття 214 А.

Порівняльний аналіз перехідних процесів вказує на те, що врахування явища неповного перекритті індуктора ЛАД вторинним елементом призводить до погіршення якості перехідного процесу. В результаті зменшується прискорення та зростає час розгону лінійного електроприводу. В даній моделі ЛАД, враховуючи довжину індуктора, ротор виходить лише на половину заданої швидкості.

Отримані результати свідчать про необхідність врахування неповного перекриття індуктора вторинним елементом, а також розробки заходів для компенсації впливу даного явища. Такі заходи можуть бути спрямовані на покращення конструкції ЛАД з довгим індуктором, а також методів керування ним.

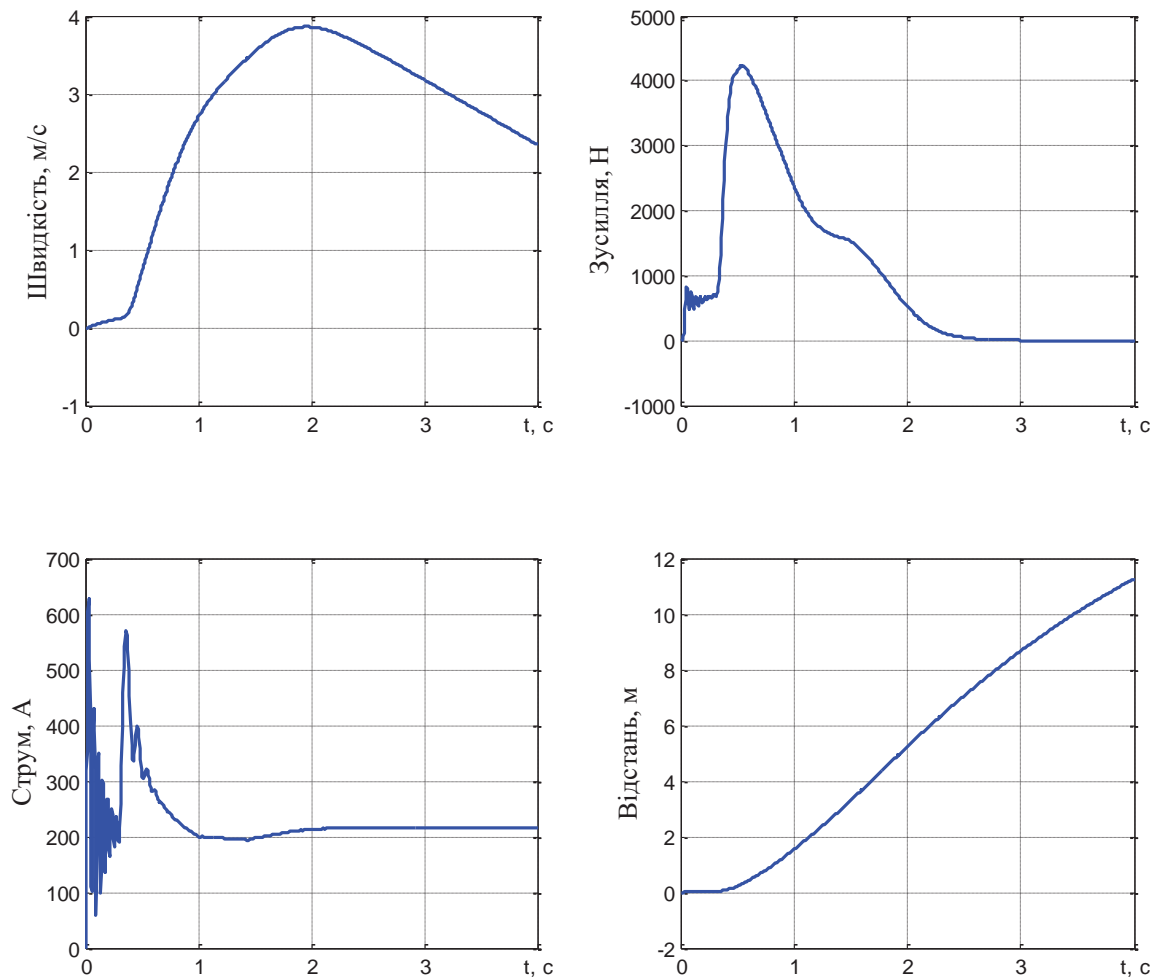


Рисунок 6.3 – Лінійна швидкість, зусилля, струм ЛАД і відстань пройдена вагонеткою при пуску під навантаженням

З рисунку 6.3 добре видно вплив коефіцієнту перекриття на струм, момент і швидкість ЛАД. Коли вагонетка проїжджає 3 метри площа перекриття реактивною полосою індуктора починає зменшуватись. Це впливає на струм і на зусилля. З графіку швидкості помітно, що в момент часу 1,3 с прискорення зменшується. Це відбувається до моменту коли вагонетка проходить 6 м і зусилля складає 0, таким чином вагонетка починає лінійно сповільнюватись.

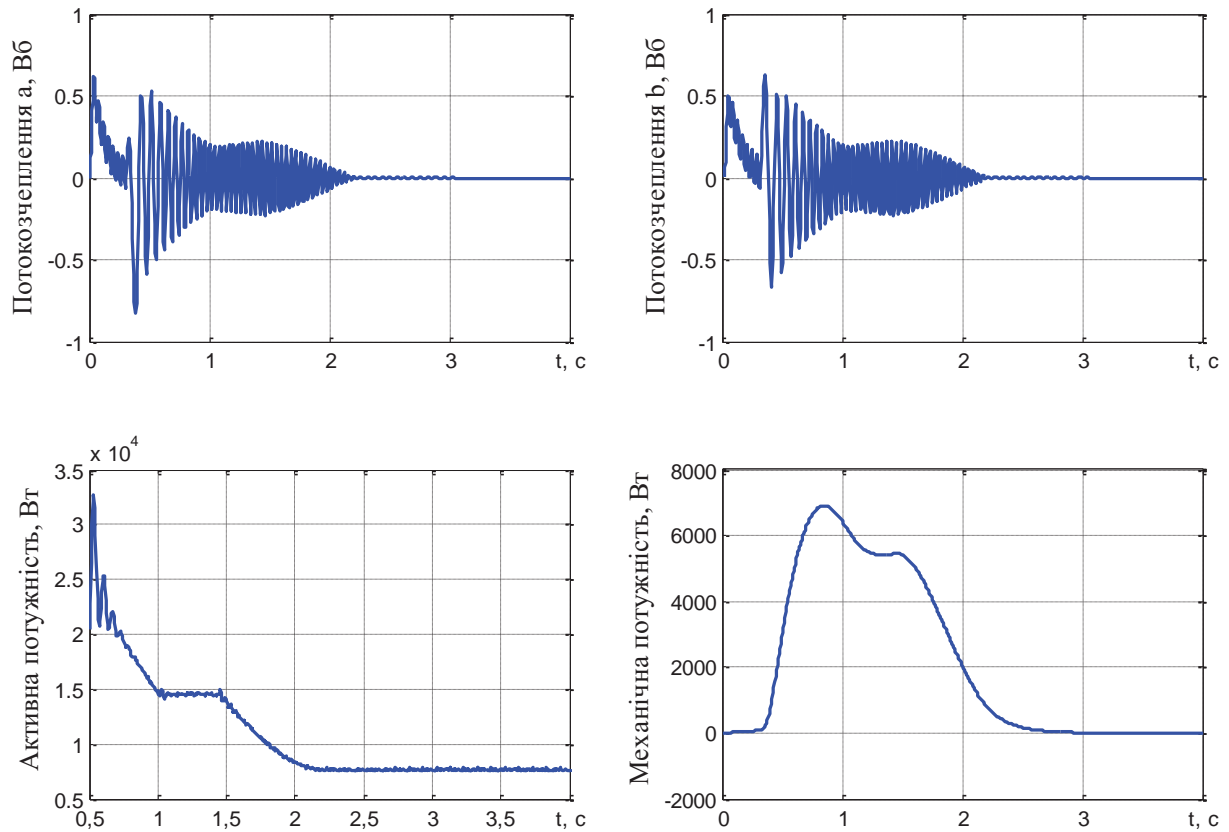


Рисунок 6.4 – Потокозчеплення, активна і механічна потужність ЛАД при пуску під навантаженням

З графіків видно, що потокозчеплення зменшується, коли площа перекриття реактивною полозою ЛАД зменшується. Активна потужність про розгоні більша за механічну. Так при піковій механчній потужності в 6910 Вт в 0,9 с, активна потужність складає 16400 Вт. Це свідчить про те що ККД лінійних електродвигунів менше ніж у обертових.

### Висновки до розділу 6

1. Результати моделювання свідчать про необхідність врахування неповного перекриття індуктора вторинним елементом, а також розробки заходів для компенсації впливу даного явища. Такі заходи можуть бути спрямовані на покращення конструкції ЛАД з довгим індуктором, а також методів керування ним.

2. Потокосцеплення і ККД в ЛАД значно менші в обертового двигуна аналогічної потужності. Так при піковій механічній потужності ЛАД в 6910 Вт в 0,9 с, активна потужність складає 16400 Вт.

3. Для плавного пуску потрібно використовувати задатчик інтенсивності. Це дозволить зменшити пускові струми і запобігти небажаних ривків для більш комфортного пересування пасажирів у вагонетці.

## 7. СТАРТАП-ПРОЕКТ. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

### 7.1 Опис ідеї проекту

Ідею проекту проаналізуємо та подамо у вигляді двох таблиць.

Перша таблиця 7.1:

- містить суть ідеї;
- напрямки використання;
- основні вигоди за напрямками застосування;
- відмінності від вже існуючих аналогів.

Таблиця 7.1 дає цілісне уявлення щодо змісту ідеї, можливих потенційних ринків збуту, можливих потенційних клієнтів.

Таблиця 7.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Суть ідеї	Напрямки використання	Переваги для клієнта
Впровадження технології Використання лінійного асинхронного двигуна в якості приводу вагонетки розважального атракціону типу «Америкавнські гірки»	1. Атракціон	Значне спрощення конструкції, скорочення технічного персоналу, збільшення швидкості реагування, точність, підвищення терміну експлуатації.
	2. Енергетика	
	3. Логістика	

1.2 В таблиці 7.2 проаналізовано техніко–економічні переваги ідеї: порівняння з існуючими аналогами та заміниками у конкурентів.

З цією метою необхідно:

- скласти перелік основних характеристик і властивостей ідеї;
- визначити коло можливих конкурентів з товарами-аналогами, що вже є на ринку; провести збір інформації значень техніко-економічних

характеристик для ідеї власного стартапу та проектів-конкурентів до певного переліку;

- провести порівняльний аналіз характеристик сторін: W - слабкі; б) N - аналогічні значення; в) S – сильніші значення (див. табл. 7.2).

Таблиця 7.2 - Виявлення слабких, нейтральних та сильних характеристик ідей проекту

№ з/п	Технічні характеристики ідеї	Конкуренти				Сторони		
		Свій проект	Bollinger & Mabillard	Rocky mountain construction	Kumbak	W слабкі	N аналогічні	S сильні
1	Зносостійкість	+						+
2	Точність позиціонування	+	+	+	+		+	
3	Низька ціна	+						+
4	Вантажність	+	+	+	+		+	
5	Габаритна маса	+						+

Проаналізувавши слабкі та сильні техніко-економічні характеристики потенційного товару (ідеї), можливо визначити основи для формування конкурентоспроможності нашої ідеї.

## 7.2 Технологічна перевірка ідеї

В цій частині потрібно зробити перевірку технології, завдяки якій можливо реалізувати створення товару (ідеї).

Необхідно провести аналіз наступних чинників (табл. 7.3):

- технологія виробництва товару згідно з ідеєю проекту;
- існування такої технології/розробка технології/доопрацювання існуючої технології;
- можливість впровадження технології автору ідеї.

Таблиця 7.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ з/п	Ідея	Реалізація технології	Існування технології	Технологічна доступність
1	Запровадження технології	Вибір ЛАД	Існує	Доступна
2				Доступна
3		Придбання контролера		Доступна
4		Написання алгоритму		Доступна

Проаналізувавши таблицю можливо зробити висновок, що маючи фінансове забезпечення на придбання лінійного асинхронного двигуна, а також контролера – можливо впровадити технологічну реалізацію проекту.

### 7.3 Можливість запуску проекту при наявних ринкових умовах

Щоб спланувати напрямки розвитку стартап-проєкту з урахуванням нинішнього ринкового стану, вимог майбутніх клієнтів, пропозицій конкурентів – потрібно визначити ринкові можливості, щоб використати їх при впровадженні ідеї-проєкту. Необхідно звернути особливу увагу на ринкові загрози, щоб найкраще убезпечити проєкт.

7.3.1 Передусім, проведемо аналіз попиту: його наявність, масштаби, зміну ринку (див. табл. 7.4).

Таблиця 7.4 – Аналіз нинішнього ринкового стану для можливостей стартап-проєкту

№ з/п	Найменування показників	Оцінка
1	Головні конкуренти, кількість од.	4
2	Оборот продажів, грн./ум.од.	\$ 3 млн.
3	Ринкова зміна	Зростає динаміка
4	Обмеження для входу на ринок	Ціна

5	Особливі вимоги до сертифікації	Відсутні
6	Середня рентабельність на ринку	12%

Проаналізувавши дані таблиці, можна зробити висновок, що виходити на ринок з ідеєю-проектом досить привабливо.

7.3.2 В цій частині визначимо потенційних клієнтів, їх вимоги до товару (див. табл. 7.5).

Таблиця 7.5 - Аналіз потенційних клієнтів, що можуть зацікавитись проектом

№ з/п	Попит, який формує нинішній ринок	Цільові сегменти ринку	Різниця у поведінці потенційних цільових групах	Потреби і вимоги потенційних клієнтів
1	Економія коштів. Збільшення швидкості реагування, точність, підвищення терміну експлуатації	Важка промисловість, Логістика, Енергетика	Для кожного проекту ЛАД розробляється окремо. Алгоритм роботи не стандартний і прописується під конкретну мету.	Гарантійні терміни безперебійної роботи. Післягарантійне обслуговування. Доступність деталей.

7.3.3 Визначивши потенційні групи клієнтів, проведемо аналіз ринкового стану: складемо таблиці з факторами, які допомагають впровадженню проекту, та факторів, які будуть перешкоджати впровадженню (табл. 7.6-7.7).

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 7.6-7.7).

Таблиця 7.6 - Фактори можливостей

№ з/п	Фактор	Можливість	Реакція
1	Довговічність	Ідея-проект може працювати без збоїв не	Велика гарантія



		менше 30 років	
2	Наявність замінних деталей і механізмів	Удосконалення проекту протягом експлуатації	Обслуговування своїми силами

Таблиця 7.7 - Фактори загроз

№ з/п	Фактор	Загроза	Реакція
1	Ціна	Збільшення ціни протягом зміни економічної ситуації в країні	При різкій зміні ціни в бік підвищення, відмова переплачувати, при наявності дешевшого аналога

7.3.4 Далі проведемо аналіз ідеї-пропозиції: визначимо, які загальні риси конкуренції на ринку в даний час (табл. 7.8).

Таблиця 7.8 - Аналіз ступеневої конкуренції

Показники конкурентного середовища	Якісні характеристики показників	Можлива поведінка підприємства
Тип конкуренції - монополістична	Товар виготовляється схожий, але для покупця він різний. Товар відрізняється якістю, дизайном, наявністю додаткових функцій.	Впроваджувати додаткові опції, послуги.
Рівень конкурентної боротьби - всесвітній	Популярність підприємств у всьому світі	Широка реклама
Галузева ознака - міжгалузева	Використання в будь-яких галузях	Розробка універсальності деталей
Конкуренція за видами товарів - товарно-видова	Конкуренція додаткових функцій товару	Розширення варіацій функцій товару
Характером конкурентних переваг - цінова	Як наслідок - цінове зростання.	Зменшення ціни, за рахунок якості (якість погіршується)

7.3.5 Тепер проведемо більш детальний аналіз конкуренції в галузі (табл. 7.9).

Використаємо модель п'яти сил М. Портера.

Таблиця 7.9 - Аналіз за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Bollinger & Mabillard, Rocky mountain construction, Kumbak	Якість наданого продукту	Передові на ринку виробництва	Отримують довговічний, якісний товар з високою точністю позиціонування	Менший термін роботи, нижча точність
Висновки	Висока і інтенсивна конкурентна боротьба – є потужні гравці на ринку	Можливість помірна. Репутація конкурентів потужна. Необхідно 4 роки, щоб проявити себе на ринку збуту	Не вказують на умови праці	Заявки на особливі пристрої в умовах конкретної роботи. Заявки на персональний алгоритм роботи.	При впровадженні аналогів буде поганий вплив на якість продукту.

Розглянувши отримані показники, можливо зробити висновок, щодо виходу і роботи на ринку зважаючи на ситуацію в галузі.

В галузі досить багато підприємств-конкурентів. Впровадження даної технології повинна підвищити якість товару. Ідея-проект має значні переваги: значне спрощення конструкції, скорочення технічного персоналу, збільшення швидкості реагування, точність, підвищення терміну експлуатації, що дозволить конкурувати, і навіть бути першим серед конкурентів.

7.3.6 Отримавши всі вищеперераховані дані – фактори маркетингового середовища (табл. 7.6-7.7), дані аналізу конкуренції п. 7.3.5 (табл. 7.9), основні характеристики ідеї проекту (табл. 7.2), вивчивши вимоги до товару (табл. 7.5) ми можемо визначити фактори конкурентоспроможності (див. табл. 7.10).

Таблиця 7.10 - Визначення факторів конкурентоспроможності

№ з/п	Фактор	Обґрунтування
1	Збільшення швидкості реагування	Відсутність механічних з'єднань збільшить термін дії механізму в декілька разів
2	Точність позиціонування	Точність позиціонування досить велика, вона дозволить використовувати цю технологію в широкому сегменті ринку

7.3.7 За нашими факторами (табл. 7.10) проведемо порівняння слабких і сильних сторін проекту (табл. 7.11).

Таблиця 7.11 - Порівняння сильних та слабких сторін лінійного асинхронного двигуна

№ з/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Bollinger & Mabillard						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Швидкість реагування	19	+						
2	Точність позиціонування	17			+				
3	Ціна	6						+	

7.3.8 В цьому пункті проведемо SWOT-аналіз: складемо матрицю аналізу сильних (Strength) і слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 7.12).

Таблиця 7.12 - SWOT- аналіз ідеї-проекту

Сильні сторони: Швидкість реагування, точність позиціонування	Слабкі сторони: Ціна
Можливість: Впровадження нової технології	Загрози: Втрата часу і коштів на впровадження нової технології.

Ринкові загрози та ринкові можливості складені на основі факторів загроз та факторів можливостей маркетингових досліджень. Ринкові загрози та ринкові можливості це прогнозовані результати впливу різних факторів, що не реалізовані на ринку та ймовірно, що вони можуть здійснитись. Це може бути зменшення доходів потенційних клієнтів – фактор загрози, який посилює значення цінового фактору при обранні товару, і як наслідок – цінової конкуренції.

7.3.9. З даних SWOT-аналізу розробимо можливу ринкову поведінку для виведення проекту на ринок та розрахуємо орієнтовний оптимальний час його реалізації з огляду на конкурентів (табл. 7.9).

Якщо визначити строки і ймовірність отримання ресурсів ми визначимо альтернативи ринкового впровадження проекту (див. табл. 7.13).

Таблиця 7.13 - Альтернативи впровадження ідеї-проекту

№ з/п	Комплекс заходів ринкової поведінки	Показник ймовірності отримання ресурсів	Строки впровадження
1	Заміна ЛАД на ЛСД	Дуже велика	3 тижні

Аналізуючи дані таблиці, бачимо, що альтернатив даному виробу майже немає. При недостатчі фінансів, можливо замінити ЛАД на ЛСД, що підвищить затрати, але покращить характеристики.

## 7.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

7.4.1 Ринкова стратегія першим кроком передбачає охоплення ринку - цільові групи потенційних покупців (табл. 7.14).

Таблиця 7.14 - Цільові групи потенційних покупців

№ з/п	Профіль цільової групи потенційних клієнтів	Готовність потенційних клієнтів сприйняти продукт	Приблизний попит в межах сегменту	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Розважальні парки	Висока	1 шт. в місяць	Висока	Невисока
2	Логістика	Середня	1 шт. в 3 місяці	Середня	Невисока
Цільові групи які обрано: всі групи, але акцентована увага на інженерії					

Ми обрали всі цільові групи, але з більшим акцентом уваги на інженерії. Використаємо стратегію диференційованого маркетингу, тому що будемо працювати із декількома сегментами, розробивши для них окремі програми ринкового впливу.

7.4.2 Необхідно сформувані базову стратегію розвитку для роботи у визначених сегментах ринку (табл. 7.15).

Таблиця 7.15 - Базова стратегія розвитку

№ з/п	Сегмент альтернативи	Стратегія	Конкурентоспроможні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Логістика	Демонстрація переваг проекту. Безкоштовне навчання. Випробувальний термін. Знижки для перших клієнтів. Більший гарантійний термін для перших клієнтів.	Відданість клієнтів перешкоджає виходу на ринок нових гравців. Відмінні властивості товару і прихильність клієнтів захищають від товарів-замінників.	Диференціація

7.4.3 Далі необхідно розробити стратегію конкурентної поведінки (табл. 7.16)

Таблиця 7.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ з/п	Проект «першопрохідний» на ринку?	Компанія буде шукати нових покупців, та відбирати існуючих у конкурентів?	Компанія буде відтворювати основні властивості продукту конкурентів?	Стратегія конкурентної поведінки
1	ні	так	ні	Виклик лідеру

7.4.4 В цій частині розробимо стратегію позиціонування. На основі вимог потенційних клієнтів, вимог до продукту (табл. 7.5), в залежності від обраної стратегії розвитку (табл. 7.15), стратегії конкурентної поведінки (табл. 7.16) розробимо нашу стратегію. Вона полягає у формуванні комплексу асоціацій, за якими клієнти можуть ідентифікувати ідею-проект.

Таблиця 7.17 - Стратегія позиціонування

№ з/п	Основні вимоги потенційних клієнтів	Основна стратегія розвитку	Конкурентоспроможні пункти власного проекту	Асоціації, які будуть формувати комплексну позицію власного проекту
1	Збільшення швидкості реагування, надійність, точність	Диференціація	Виклик лідеру	Швидкість, точність, надійність, новизна

В результаті втілення підпункту ми визначили напрям дій стартап-компанії на ринку, а саме – медицини, інженерії та ін.

## 7.5 Розробка маркетингової стратегії стартап-проекту

7.5.1 Перше - маркетингова концепція товару, який отримає покупець. Потрібно підсумувати результати аналізу конкурентоспроможності товару (табл. 7.18).

Таблиця 7.18 - Ключові переваги концепції потенційного товару

№ з/п	Потрібно	Вигоди товару	Переваги перед конкурентами
1	Впровадження нової технології	Збільшення довготривалості	Заміна обертальних двигунів на ЛАД видалить механічні взаємодії, що призведе до значного збільшення терміну дії
2		Точність позиціонування	Використання ЛАД підвищить точність позиціонування

7.5.2 Далі розробимо трирівневу маркетингову модель товару: уточнюємо ідею продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 7.19).

Таблиця 7.19 - Характеристики рівнів моделі товару

Рівні моделі	Складові та особливості		
Товар яким задумувався	Необхідність в збільшенні швидкості реагування і в точності позиціонування, для виконання поставлених задач		
Реальний товар	Характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Див. п.п. 1.7 і 2.4		
	Пакування притаманне такому виду продукту		
	Марка: Roller engine, motor		
Товар з підкріпленням	Надається перед продажем		
	Надається після продажу		
Товар буде захищено від копіювання завдяки патентуванню.			

7.5.3 Визначимо цінові межі, якими ми будемо керуватись при формуванні ціни на продукцію. Кінцева ціна буде визначена при фінансово-економічному аналізі проекту. Ми порівняємо ціни на продукти аналоги і рівень фінансової спроможності потенційних споживачів (табл. 7.20).

Таблиця 7.20 - Межі формування ціни

Діапазон цін на товари замітники (грн.)	Діапазон цін на аналогічні товари (грн.)	Показник фінансової спроможності потенційних клієнтів	Діапазон ціни на продукцію (грн.)
100000-500000	400000-1000000	Високий	600000-1200000

7.5.4 Наступний крок - визначення найкращої схеми реалізації (табл. 7.21):

- реалізовувати продукцію власними силами (власна система збуту);
- залучати до реалізації посередників (залучена система збуту);
- вибір глибини каналу збуту;
- вибір посередників.

Таблиця 7.21 - Система збуту

№ з/п	Поведінка потенційних клієнтів при закупівлях	Основні вимоги до постачальників при збуті продукції	Наявність глибини каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Звичайна	Комплексний підхід	Так, наявна	Традиційна

7.5.5 Далі необхідно розробити маркетингову програму комунікацій, вона опирається на обрану раніше основу для визначення поведінки потенційних покупців (табл. 7.22).

Таблиця 7.22 - Маркетингова комунікація



№ з/п	Особливості поведінки потенційних покупців	Канали комунікації, що використовують потенційні покупці	Основні позиції для налаштування	Задача реклами
1	Звичайна	Інтернет	Звичайні	Довести необхідність заміни старої технології на нову

В результаті ми створили маркетингову програму яка включає в себе стратегію диверсифікації, стратегію розвитку ринку, стратегію розвитку товару, стратегію глибокого проникнення на ринку. Це все потрібно, щоб зрозуміти як продати наш товар.

### **Висновки до розділу 7**

1. Наявність попиту, динаміки ринку, рентабельності роботи свідчать про можливість ринкової комерціалізації проекту.
2. Проведений аналіз техніко-економічних показників підтверджує перспективи впровадження проекту з огляду на сегменти потенційних клієнтів, стан конкуренції, конкурентоспроможність.

## ВИСНОВКИ

1. Проведений аналітичний огляд в області лінійних двигунів показав доцільність застосування лінійного електроприводу з довгим індуктором в скіпових підйомних установках і, в тому числі, на атракціонах типу «Американські гірки»; в результаті сформульовані вимоги до лінійного електроприводу, обрано вид ЛАД з довгим секціонованим нерухомим індуктором і короткою реактивною полоєю. Розроблена конструкція вагонетки для використання з лінійним електроприводом. Для траси підйому вагонетки буде використано 10 секцій ЛАД по 3 метри кожна. Довжина вторинного елемента складає 3 м. Послідовне вмикання секцій ЛАД дозволить підвищити енергоефективність системи електроприводу.

2. Визначено необхідні тягове зусилля та потужність, які повинен створювати ЛАД для забезпечення заданої сили тяги та прискорення, розраховано конструктивні властивості, такі як параметри індуктора і ротора, кількість і переріз витків обмотки, визначено електричні параметри двигуна та його схеми заміщення.

3. Обрано перетворювач частоти DA1-34150FB-B55C за допомогою якого буде відбуватися живлення та керування швидкістю лінійного двигуна та автоматичний вимикач NZMH3-AE250-AVE для захисту струмів первантаження і струмів к.з.

4. Виконано синтез і розроблено програму керування системою атоматизації ліній ного електроприводу. Визначено переваги лінійного електроприводу з безконтактною схемою керування багатосекційним ЛД з довгим індуктором: простота конструкції, можливість отримання тягового зусилля безпосередньо, без механічного контакту між первинною і вторинною частинами ЛД, відсутність струмопідводу до ротора, економія електроенергії за рахунок подачі живлення лише на активну секцію індуктора під час руху ротора, інші секції індуктора при цьому залишаються відключеними, можливість побічного регулювання прискорення та швидкості в процесі руху

ротора за рахунок затримки та інверсної комутації секцій індуктора без регулювання параметрів мережі живлення. До недоліків лінійного електроприводу з довгим індуктором можна віднести: значні капітальні вкладення у зв'язку з великою довжиною активного індуктора, необхідність забезпечення постійної величини робочого повітряного зазору між індуктором та вторинним елементом по всій довжині ЛАД, знижені значення ККД і коефіцієнта потужності внаслідок відносно великої величини робочого зазору та кінцевих ефектів, викликаних розімкненістю магнітопроводу, складність розрахунку та математичного моделювання ЛАД у зв'язку з необхідністю врахування неповного перекриття індуктора вторинним елементом в процесі руху і насичення магнітної системи.

5. Складена математична модель ЛАД. Особливістю даної моделі є те, що в ній враховуються кінцеві ефекти, які викликають асиметрію струмів і магнітного поля, що в свою чергу викликає погіршення ККД і  $\cos\phi$  двигуна. Крім того дана математична модель враховує коефіцієнт перекриття реактивною полозою індуктора. За основу моделі прийнята Т-подібна схема заміщення ЛАД, яку отримано шляхом синтезу схем, що враховують поперечний і поздовжний крайовий та кінцевий ефекти, а також конструктивне виконання ЛАД з довгим і коротким вторинним елементом. Велика величина зазорів ЛАД викликає необхідність підвищення індукції у первинній частині двигуна (індукторі). З цієї ж причини величина індукції у вторинному елементі виявляється зниженою.

6. Отримані результати моделювання в програмному середовищі Matlab Simulink свідчать про необхідність врахування неповного перекриття індуктора вторинним елементом, а також розробки заходів для компенсації впливу даного явища. Такі заходи можуть бути спрямовані на покращення конструкції ЛАД з довгим індуктором, а також методів керування ним. Для плавного пуску потрібно використовувати задатчик інтенсивності. Це дозволить зменшити пускові струми і запобігти небажаних ривків для більш комфортного пересування пасажирів у вагонетці.

7. Проведено аналіз економічних можливостей реалізації проекту. Наявність попиту, динаміки ринку, рентабельності роботи дають можливість ринкової комерціалізації проекту. Великі перспективи впровадження з огляду на сегменти потенційних клієнтів, стан конкуренції, свідчать про конкурентоспроможність проекту.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Is Attendance Rising at Walt Disney World?/ URL: <https://www.themeparkinsider.com/flume/202009/7744/> (дата звернення: 11.12.2020)
2. Лінійний електропривод вагонетки атракціону/ URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php> (дата звернення: 11.12.2020)
3. Скиповый подъемник/ URL: <https://toplivopodacha.ru/skip-hoist.html> (дата звернення: 11.12.2020)
4. Электропривод и автоматизация скипового подъемника/ URL: [https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/24882/2018\\_577\\_Suetovvyyu.pdf?sequence=1](https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/24882/2018_577_Suetovvyyu.pdf?sequence=1) (дата звернення: 11.12.2020)
5. Линейные электродвигатели / URL: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/lineynye-elektrodvigateli.html> (дата звернення: 11.12.2020)
6. Ліфтова установка з лінійним електроприводом / URL: <https://epa.kpi.ua/science/publications/spea-2013/liftova-ustanovka-z-linijnim-elektroprivodom-teryayev-v-i-dots-hitko-m-a-magistrant/> (дата звернення: 11.12.2020)
7. Конструктивные особенности линейных электродвигателей / URL: <http://ruaut.ru/content/publikacii/electro/konstruktivnye-osobennosti-lineynykh-elektrodvigateley.html> (дата звернення: 11.12.2020)
8. Thrust and Efficiency Analysis of Linear Induction Motors for SemiHigh-Speed Maglev Trains Using 2D Finite Element Models/ URL: <https://scihub.tw/https://ieeexplore.ieee.org/document/7816093> (дата звернення: 11.12.2020)
9. Применение линейных двигателей - достоинства и недостатки линейного двигателя / URL: <https://lokomotiv.ru/podvizhnoy-sostav/primenenie-lineynyh-dvigatelay/Page-4.html> (дата звернення: 11.12.2020)

10. Линейные электродвигатели. Основные разновидности и их применение/  
URL: <http://ruaut.ru/content/publikacii/electro/lineynye-elektrodvigateli-osnovnye-raznovidnosti-i-ikh-primenenie.html> (дата звернення: 11.12.2020)
11. Permanent Magnet Synchronous Linear Motor for an Urban Transport Electric Vehicle/ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7579845> (дата звернення: 11.12.2020)
12. Experimental research of linear induction motor for urban mass transit/ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5663548> (дата звернення: 11.12.2020)
13. IGBT Applications: Other URL :  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455731435000183> (дата звернення: 11.12.2020)
14. Theme Park Tech: An Insider's look at Linear Induction Motors/ URL: <https://www.themeparkinsider.com/flume/201302/3358/> (дата звернення: 11.12.2020)
15. Greyout/ URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Greyout> (дата звернення: 11.12.2020)
16. Intimidator 305/ URL: [https://coasterpedia.net/wiki/Intimidator\\_305](https://coasterpedia.net/wiki/Intimidator_305) (дата звернення: 11.12.2020)
17. Intimidator 305/ URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Intimidator\\_305](https://en.wikipedia.org/wiki/Intimidator_305) (дата звернення: 11.12.2020)
18. Intimidator 305/ URL [https://rollercoaster.fandom.com/wiki/Intimidator\\_305](https://rollercoaster.fandom.com/wiki/Intimidator_305) (дата звернення: 11.12.2020)
19. Теряєв В.І. Методика розрахунку параметрів лінійного асинхронного електродвигуна. Авторське право на науковий твір, свідоцтво №85028, дата реєстрації 30.01.2019 р.
20. Преобразователь частоты DA1-34150FB-B55C/ URL: [https://datasheet.eaton.com/datasheet.php?model=169401&locale=en\\_GB](https://datasheet.eaton.com/datasheet.php?model=169401&locale=en_GB) (дата звернення: 11.12.2020)
21. Автомат электрический ABB NZMH3-AE250-AVE 110849/ URL: <https://electrocontrol.com.ua/avtomaticheskie-vyklyuchateli/vykatnoi->

[avtomaticheskii-vykluchatel-250a-3-polusa-otkl-sposobnost-150ka-elektronnyi-rascepitel-eaton-nzmk3-ae250-ave-110849](#) (дата звернення: 11.12.2020)

22. Бесконтактное измерение скорости и дистанции - исд-3/ URL: <http://www.sensorika.com/ru/datchiki/opticheskij-datchik-skorosti-i-distantsii/> (дата звернення: 17.12.2020)

23. Попович М.Г, Лозинський М.Ю Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Підручник Київ: «Либідь», 2005. 680 с.

24. Гавриш О.А., Солнцев С.О., Дергачова В.В., Зозульов О.В., Юдіна Н.В., Царьова Т.О. Бояринова К.О., Кравченко М.О., Жигалкевич Ж.М. Розроблення стартап проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей Київ: НТУУ «КПІ ім Ігоря Сікорського». 2016

25. Пересада С.М., Ковбаса С.Н. Бовкунович В.С. Грубое управление моментом и потоком асинхронного двигателя. Национальный техн. ун-т Украины «КПИ им. Игоря Сикорского». 2010 р.

26. Теорія мехатронних систем – 1: Конспект лекцій для студентів денної навчання напрямку 6.050702 «Електромеханіка»// Уклад: С.М. Пересада ред. В.І. Теряєв: –К.: ФЕА НТУУ “КПІ”, –2013 р. – 81 с.

27. Епифанов, А.П Основы электропривода / А.П Епифанов. - СПб.: Лань, 2008. - 192 с.

28. Аксенов, М.И. Моделирование электропривода: Учебное пособие / М.И. Аксенов. - М.: Инфра-М, 2014. - 104 с.

29. Півняк Г.Г. Сучасні частотно – регульовані асинхронні електроприводи з широтно – імпульсною модуляцією : монографія / Г.Г. Півняк, О.В. Волков.- Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2006. – 470 с.

30. Попович М. Г. Теорія електропривода: Підручник / За ред. Поповича М. Г. –К.: Вища школа, 1993. – 494с.